

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Donatas AVIŽA

PASTATO ATITVARŲ RACIONALIAUS  
TERMOIZOLIACINIO SLUOKSNIO  
DAUGIATIKSLĖ SELEKTONOVACIJA

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
STATYBOS INŽINERIJA (02T)

  
Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2016

Disertacija rengta 2011–2016 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Mokslinis vadovas**

prof. dr. Zenonas TURSKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

prof. dr. Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

### **Nariai:**

doc. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

prof. dr. Dalė DZEMYDIENĖ (Mykolo Romerio universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Joanicjusz NAZARKO (Balstogės technologijos universitetas, vadyba – 03S),

dr. Marijonas SINICA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. gegužės 6 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva. Tel. (8 5) 274 4956; faks. (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2016 m. balandžio 5 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2361-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-911-0

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2016

© Donatas Aviža, 2016

donatas.aviza@yahoo.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Donatas AVIŽA

**MULTI-PURPOSE SELECTION  
OF AN OPTIMAL THERMAL INSULATION  
LAYER FOR BUILDING ENVELOPES**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
CIVIL ENGINEERING (02T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2016

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2016.

### **Scientific supervisor**

Prof. Dr Zenonas TURSKIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

### **Chairman**

Prof. Dr Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

### **Members:**

Assoc. Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Prof. Dr Dalė DZEMYDIENĖ (Mykolas Romeris University, Informatics Engineering – 07T),

Prof. Dr Habil. Joanicjusz NAZARKO (Bialystok University of Technology, Management – 03S),

Dr Marijonas SINICA (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 6 May 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax: +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 5 April 2016.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

# Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas pastato atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankos uždavinys ir daugiatislo vertinimo sistema pritaikoma šiam uždaviniui spręsti.

Pagrindinis darbo tikslas – pasiūlyti daugiatislės selektonovacijos integruotą modelį pastato atitvarų racionaliam termoizoliaciniam sluoksniui nustatyti ir pateikti jo praktinio taikymo algoritmą. Disertacijoje pritaikyti esami kiekybiniai daugiatisliai sprendimų priėmimo metodai bei pasiūlyti jų deriniai efektyviam atitvarų termoizoliaciniam sluoksniui nustatyti.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pateikiami autoriaus pranešimai konferencijose, publikacijos, taip pat pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros ir mokslinių tyrimų apžvalga nagrinėjama tematika. Apžvelgiami pastato energinio naudingumo vertinimo ir optimalios kainos nustatymo empiriniai tyrimai. Apžvelgiama problematika užsienio valstybėse ir Lietuvoje nagrinėjama tema. Pateikiama daugiatislių sprendimo metodų apžvalga, jų tinkamumo disertacijos uždaviniui spręsti analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pristatomas teorinis daugiatislės selektonovacijos integruoto sprendimo priėmimo (DSISP) sistemos modelis. Pateikiamas klimato įtakos termoizoliaciniam sluoksniams empirinis tyrimas, apibrėžiama pastato išorės atitvarų šilumos perdavimo koeficientų, šiluminių nuostolių ir sutaupymų skaičiavimo metodologija. Pasiūlyti racionalūs daugiatislo vertinimo metodų deriniai tinkami nagrinėjamam uždaviniui spręsti.

Trečiajame skyriuje pristatomas DSISP modelio praktinis taikymas vienbučio gyvenamojo pastato išorės atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankai vertinti, o gauti rezultatai palyginami.

Disertacijos tema paskelbta dvylika mokslinių straipsnių, iš kurių trys referuojami duomenų bazės Thomson Reuters *Web of Knowledge (ISI Web of Science)* cituojamuose žurnaluose, aštuoni straipsniai pristatyti konferencijų darbų leidiniuose mokslo konferencijose ir vienas straipsnis – kituose recenzuojamuose leidiniuose.

# Abstract

The building envelopes' optimal thermal insulation layer selection problem is investigated and multi-attribute assessment system in order to solve this problem is applied in the present thesis.

The main object of this thesis is to propose building envelopes' optimal thermal insulation layer multi-purpose selection integrated decision making model and its algorithm as well as to adapt to the model which is in the process of creation the available proper quantitative multi-attribute decision making methods and to propose their combinations in order to determine an effective thermal insulation layer for building envelopes.

The thesis consists of the following parts: introduction, three chapters, general conclusions, references, the List of scientific publications by the author on the subject of the thesis and annexes.

The Introduction reveals the investigated problem, relevance of the thesis and the object of research. It describes the purpose, the tasks and scientific novelty of the paper, provides the defended statements. The structure of the dissertation, author's publications and conferences presentations are provided at the end of the introduction.

Chapter 1 reviews literature and scientific investigations on the subject of the thesis. The empirical investigations of building energy performance assessment and optimal pricing are reviewed. The problems in foreign countries and in Lithuania related with the subject of the thesis are introduced. A survey of multi-attribute decision making methods and analysis regarding their applicability in case of solving the problem of thesis are presented. At the end of the Chapter the conclusions are formulated and the tasks of thesis are specified.

Chapter 2 introduces theoretical model of multi-purpose selection integrated decision making (MSIDM) system. The empirical investigation of climate influence on the thermal insulation layers is presented, the methodology of building envelopes coefficients of heat transmission, heat loss and calculation of savings is defined. Rational multi-attribute assessment methods combinations were proposed which are suitable to solve the analysed task.

Chapter 3 presents MSIDM model practical application for the assessment of selection of the detached residential building envelopes optimal thermal insulation layer and represents the comparison of the obtained results.

Twelve scientific articles were published on the subject of this thesis, three of them were peer-reviewed by the cited journals from database Thomson Reuters *Web of Knowledge (ISI Web of Science)*, eight articles were presented in the proceedings of scientific conferences and one article – in the other peer-reviewed publication.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$x_{ij}$  – rodiklio efektyvumo vertė;

$a_{ij}$  – alternatyva;

$q_j$  – rodiklio reikšmingumas;

$n$  – rodiklių skaičius.

$m$  – alternatyvų skaičius.

## Santrumpos

AM – Aplinkos ministerija;

COPRAS – daugiatis kompleksinio proporcingo įvertinimo metodas (angl. *Method of Multiple Criteria Complex Proportional Assessment*);

ES – Europos Sąjunga;

GDV – grynoji dabartinė vertė;

ISNAEI – inžinerinės sistemos, naudojančios atsinaujinančius energijos išteklius;

KTU – Kauno technologijos universitetas;

LLC – bendrosios sąnaudos per visą gyvavimo ciklą (angl. *life-cycle cost*)

LSD – Lietuvos statistikos departamentas;

MADM – daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas (angl. *Multiple Attribute Decision Making*);

MCDM – daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas (angl. *Multiple Criteria Decision Making*);

MODM – daugiatis sprendimų priėmimo metodas (angl. *Multi(ple) Objective Decision Making*);

NZEB arba Net-Zero – energijos beveik nevirtojantis pastatas;  
PVM – pridėtinės vertės mokestis;  
SAW – paprastas adityvus svėrimo metodas (angl. *Simple Additive Weighting*);  
TOPSIS – artumo idealiajam taškui sprendimo priėmimo metodas (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);  
VMI – Valstybinė mokesčių inspekcija;  
VGTU – Vilniaus Gedimino technikos universitetas;  
VKEKK – Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija.



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas .....	1
Darbo aktualumas .....	3
Tyrimų objektas .....	3
Darbo tikslas .....	4
Darbo uždaviniai .....	4
Tyrimų metodika .....	4
Darbo mokslinis naujumas .....	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	5
Ginamieji teiginiai .....	6
Darbo rezultatų aprobavimas .....	6
Disertacijos struktūra .....	7
1. PASTATO ENERGINIS NAUDINGUMAS IR OPTIMALIOS KAINOS NUSTATYMAS: MOKSLINIS BEI TEISINIS POŽIŪRIAI .....	9
1.1. Mažai energijos naudojančio pastato samprata mokslinėje literatūroje .....	10
1.2. Moksliniai tyrimai ir mažaaenergių pastatų projektavimo tendencijos Europoje .....	11
1.3. Pastatų energinio naudingumo ir optimalios kainos nustatymo reglamentavimas Europos Sąjungoje .....	22
1.4. Vienbučių gyvenamųjų pastatų energinio naudingumo projektavimo praktika Lietuvoje .....	26
1.5. Daugiatikslių sprendimo priėmimo metodų parinkimas komplekiniams uždaviniams spręsti .....	30
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas .....	35

2. DAUGIATIKSLĖS SELEKTONOVACIJOS MODELIS PASTATO ATITVARŲ RACIONALIAM TERMOIZOLIACINIAM SLUOKSNIUI PARINKTI .....	37
2.1. Klimato įtakos termoizoliaciniams sluoksniams empirinis tyrimas Lietuvos sąlygomis.....	44
2.2. Pastato išorės atitvarų šilumos perdavimo koeficientų, šiluminių nuostolių ir sutaupymų skaičiavimo metodologija.....	47
2.3. Optimalios kainos nustatymo pagal bendrąsias sąnaudas analizė .....	56
2.4. Rodiklių reikšmingumų nustatymas .....	61
2.5. SAW metodas.....	68
2.6. COPRAS metodas .....	68
2.7. TOPSIS metodas .....	69
2.8. COPELAND metodas ir rezultatų palyginimas.....	70
2.9. Antrojo skyriaus išvados .....	74
3. DAUGIATIKSLĖS SELEKTONOVACIJOS MODELIO PRAKTINIS TAIKYMAS VIENBUČIAM GYVENAMAJAM PASTATUI .....	75
3.1. Vienbučio gyvenamojo pastato tyrimų modelis .....	76
3.2. Vertinimo metodologija .....	81
3.3. Gautų rezultatų sintezė .....	96
3.4. Daugiatikslės selektonovacijos modeliavimo programa .....	98
3.5. Trečiojo skyriaus išvados .....	103
BENDROSIOS IŠVADOS .....	105
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	107
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	121
SUMMARY IN ENGLISH.....	125
PRIEDAI* .....	135
A priedas. Atitvarų (grindų ant grunto, sienų ir stogo) mazgai .....	137
B priedas. Vidutinė energijos kaina Lietuvoje 2015 m. ....	141
C priedas. Daugiatikslių sprendimo metodų skaičiavimų rezultatai .....	145
D priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje .....	149
E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	167

---

\* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis.....	3
Object of the research .....	3
Aim of the thesis .....	4
Objectives of the thesis .....	4
Methodology of the research .....	4
Scientific novelty of the thesis .....	5
Practical value of the research findings.....	5
Defended statements .....	6
Approval of the research findings .....	6
Structure of the thesis .....	7
1. BUILDING ENERGY PERFORMANCE AND OPTIMAL COSTS:	
SCIENTIFIC AND REGULATORY APPROACH.....	9
1.1. Concept of low-energy building in the scientific literature .....	10
1.2. Research studies and low-energy buildings' design tendencies in Europe .....	11
1.3. Regulation of building energy performance and optimal pricing in the European Union.....	22
1.4. Design practice in Lithuania for energy efficient detached residential buildings .....	26
1.5. Choosing of multi-attribute decision making methods to solve complex tasks .....	30

1.6. Conclusions of Chapter 1 and thesis tasks' formulation .....	35
2. MULTI-PURPOSE SELECTONOVATION MODEL FOR CHOOSING THE BUILDING ENVELOPES' OPTIMAL THERMAL INSULATION LAYER .....	37
2.1. Empirical investigation of climate influence on thermal insulation layers under conditions of Lithuania .....	44
2.2. Methodology of building envelopes' coefficients of heat transmission, heat loss and calculation of savings .....	47
2.3. Analysis of optimal pricing according to global costs.....	56
2.4. Setting weights of criteria.....	61
2.5. SAW method.....	68
2.6. COPRAS method.....	68
2.7. TOPSIS method.....	69
2.8. COPELAND method and the comparison of results .....	70
2.9. Conclusions of Chapter 2.....	74
3. PRACTICAL APPLICATION OF MULTI-PURPOSE SELECTONOVATION MODEL TO DETACHED RESIDENTIAL BUILDING .....	75
3.1. Investigation model for detached residential building .....	76
3.2. Assessment methodology .....	81
3.3. Synthesis of obtained results .....	96
3.4. Multi-purpose selectonovation simulation program .....	98
3.5. Conclusions of Chapter 3.....	103
GENERAL CONCLUSIONS .....	111
REFERENCES .....	113
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE SUBJECT OF THE THESIS .....	121
SUMMARY IN ENGLISH.....	125
ANNEXES* .....	135
Annex A. Details of envelopes (floors, walls and roof) .....	137
Annex B. Average energy price in Lithuania for the year 2015.....	141
Annex C. Multi-purpose decision making calculation results .....	145
Annex D. Agreements of co-authors to provide published materials in the doctoral dissertation.....	149
Annex E. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	167

---

\* The annexes are available in the CD attached to the dissertation

---

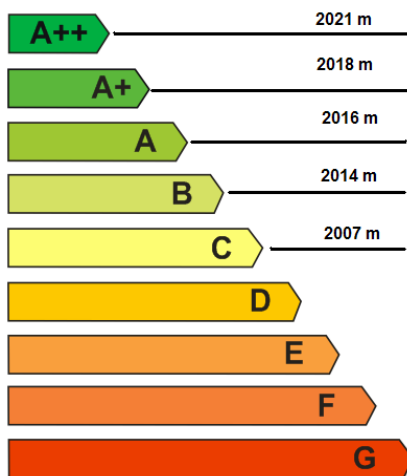
# Įvadas

## Problemos formulavimas

Gyvenamųjų namų ir visuomeninių pastatų sektoriuje galima sutaupyti daug energijos, statant racionaliai apšiltintus pastatus arba juos efektyviai atnaujinant. Šioje šakoje suvartojama apie 40 % visos energijos kiekio (Kaynakli *et al.* 2012). Diskusija šiuo klausimu vyksta ir tarptautiniu mastu. Jungtinėse Amerikos Valstijose yra patvirtinta energijos taupymo deklaracija „The Energy Independence and Security Act of 2007“, kurioje numatyta sumažinti vartojamos energijos kiekį pastatų sektoriuje iki 2030 m., o visiškai įgyvendinti reformą iki 2050 metų (Marszal *et al.* 2012 ir kt.).

Dėl aplinkosauginių ir finansinių priežasčių energijos vartojimas bei valdymas aktualus ir Azijos regionui. Kinijos tikslas – 20 proc. padidinti energijos vartojimo efektyvumą per 5 metų laikotarpį (Xiangfei *et al.* 2012 ir kt.).

Lietuvoje energijos suvartojimo efektyvumo didinimas pastatų sektoriuje irgi yra didelis siekinys. Norint laiku pasiekti užsibrėžtus tikslus, t. y. pereiti nuo minimalių energinio naudingumo reikalavimų prie A++ klasės (1 pav.), svarbu racionaliai įvertinti optimalų atitvarų apšildymo būdą bei atsiperkamumo įtaką galutinių sprendimų priėmimui.



**1 pav.** Pastatų energinio naudingumo klasifikavimas į klases: A++ klasė – aukščiausia, nurodanti energijos beveik nevartojantį pastatą, G klasė nurodo energiškai neefektyvų pastatą (Aviža *et al.* 2015)

**Fig. 1.** Classification of energy performance of buildings Class: A++ indicates a highly energy-efficient building, Class G indicates an energy-inefficient building (Aviža *et al.* 2015)

Šioje disertacijoje nagrinėjama pastato išorės atitvarų (sienų, stogo ir grindų ant grunto, žr. 2 pav.) racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankos sistema, pagrįsta *energinio* ir *ekonominio* efektyvumo principais.



**2 pav.** Pastato išorės atitvaros, darančios įtaką energijos vartojimui (The International Energy Agency (IEA 2016))

**Fig. 2.** The building envelope affect energy use (IEA 2016)

Problema ta, kad pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančius energinio naudingumo norminius dokumentus atitvaros vertinamos tik pagal šilumos perdavimo koeficiento dydį, neatsižvelgiant į atitvarų gyvavimo ciklą, racionalią kainą, energijos rūšį, šilumos šaltinį, klimato zonas. Visa Lietuva vertinama kaip vienas klimatinis rajonas, kurio vidutinė šildymo sezono išorės oro temperatūra  $+0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Skirtingose Lietuvos klimato zonose yra skirtinga išorės oro temperatūra, pastatams apšildyti naudojami įvairūs šilumos šaltiniai, todėl šiame darbe detaliau iš-tirtas šis faktas bei pateikta tikslesnė racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atran-kos vertinimo sistema.

## Darbo aktualumas

Nuo 2020 m. gruodžio 31 d. Europos Sąjungos valstybės narės pagal Europos direktyvos 2010/31/EU reikalavimus turi užtikrinti, kad visi naujai statomi pasta-tai būtų beveik nulinės energijos pastatai. Tam tikslui pasiekti yra skirtas penkerių metų laikotarpis (Marszal *et al.* 2012 ir kt.).

Pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančius norminius reikalavimus bei statybos techninio reglamento STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energi-nio naudingumo sertifikavimas“ nuostatas pastatai klasifikuojami į 9 energinio naudingumo klases: A++, A+, A, B, C, D, E, F, G (G klasė – neefektyvūs, daug energijos suvartojantys pastatai).

Tradiciniai naujos statybos ir modernizuojami pastatai Lietuvoje statomi bei projektuojami pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.09:2012 nuostatas, o tai reiškia, kad dažniausiai pasiekiami tik minimalūs techniniai reikalavimai, tačiau neatsižvelgiama į atitvarų gyvavimo ciklą, globalias sąnaudas, optimalią tokio sprendinio kainą.

Efektyviai suprojektuoti ir pastatyti energijos beveik nevartojančius pastatus (pasiekti A++ klasę) yra didelis iššūkis ne tik Lietuvai, bet ir Europai. Užsienio mokslininkų patirties bei analizės šiuo klausimu nėra daug. Todėl moksliniai šios krypties tyrimai yra būtini ir atliekami laiku, kaip akcentuojama straipsniuose (Kurnitski *et al.* 2011 ir kt.).

## Tyrimų objektas

Daugiatikslis pastato atitvarų termoizoliacinio sluoksnio efektyvumo vertinimas, taikant optimalios kainos ir energinio naudingumo principus.

## Darbo tikslas

Pasiūlyti daugiatakslės selektonovacijos integruotą modelį pastato atitvarų racionaliam termoizoliaciniam sluoksniui nustatyti ir pateikti jo praktinio taikymo algoritmą.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros, Europos Sąjungos ir Lietuvos teisinio reglamentavimo, susijusio su pastatų energiniu naudingumu ir optimalios kainos nustatymu mažaeenergių pastatų projektavimo kontekste, analizę.
2. Ištirti daugiatakslių sprendimo priėmimo metodų taikymo galimybes kompleksiniams uždaviniams spręsti.
3. Sudaryti energinio efektyvumo bei racionalios kainos principais grindžiamą, pastato atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio daugiatakslės selektonovacijos teorinį vertinimo modelį, atsižvelgiant į atitvarų tipą, Lietuvos klimato duomenis, skirtingus energijos šaltinius.
4. Sudaryti scenarijų sistemą integruotam mikro- ir makroekonominiam vertinimui bei sąnaudų atžvilgiu racionaliam sprendimui atrinkti.
5. Išanalizuoti energinio naudingumo poveikį eksploatavimo efektyvumui ir pasiūlyti rodiklių sistemą daugiatakslių sprendimo priėmimo metodų kompleksui sudaryti.
6. Praktiškai pritaikyti integruotą daugiatakslės selektonovacijos modelio algoritmą vienbučiam gyvenamajam pastatui.
7. Gautus rezultatus palyginti su energijos beveik nevartojančio pastato reikalavimais.

## Tyrimų metodika

Rengiant darbą remtasi užsienio ir Lietuvos mokslininkų publikacijų analize, pastato energinio naudingumo sertifikavimo duomenimis. Pastato atitvarų termoizoliaciniam sluoksniui vertinti efektyvumo rodiklių sistema sudaryta pagal įvairių



institucijų informacijos šaltinių duomenis. Daugiatiksliam integruotam sprendimui pagrįsti taikomi daugiatikslio sprendimo priėmimo metodai (SAW, COPRAS, TOPSIS), ekspertinis vertinimas, rezultatų apibendrinimo COPELAND metodas, scenarijų modeliavimas, atliekamas gautų skaičiavimo rezultatų palyginimas bei sintezė.

## **Darbo mokslinis naujumas**

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurta rodiklių sistema, geriausio sprendimo atrankai, apibrėžiant atitvatų termoizoliacinio sluoksnio storį, energinio naudingumo klasę, globalias sąnaudas, atsipirkimo laiką ir priemonių patikimumo indeksą.
2. Sukurtas energinio efektyvumo ir racionalios kainos principais grindžiamas, teorinis daugiatikslės selektonovacijos modelis, taikomas pastatų atitvarų termoizoliaciniam sluoksniui vertinti.
3. Sukurta integruoto mikro- ir makroekonominių rodiklių sistema scenarijams vertinti, nustatant sąnaudų atžvilgiu racionalius sprendinius.
4. Pasiūlytas efektyvus daugiatikslio sprendimo priėmimo metodų kompleksas: SAW metodas + COPRAS metodas + TOPSIS metodas + integruotas COPELAND metodas.
5. Sukurtas rezultatų palyginimo modelis, leidžiantis tarpusavyje palyginti efektyvaus termoizoliacinio sluoksnio storius įvairiais požūriais: pagal energinio naudingumo klasių spektrą, skirtingus energijos šaltinius, klimato duomenis, racionalumo ir efektyvumo ribas, o gauti rezultatai palyginti su energijos beveik nevartojančio pastato reikalavimais.
6. Pritaikius daugiatikslio vertinimo teorinį modelį, pateiktas vienbučio gyvenamojo pastato išorės atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio daugiatikslės selektonovacijos praktinis realizavimas.

## **Darbo rezultatų praktinė reikšmė**

Tyrimų rezultatai gali būti naudingi projektavimo, auditavimo ir statybos įmonems numatant racionalius atitvarų apšiltinimo sprendinius. Pasiūlytas daugiatikslio vertinimo algoritmas, sukurta selektonovacijos modeliavimo programa,

pastato atitvarų efektyviems termoizoliacinio sluoksnio storiams, bendrosioms sąnaudoms ir atsipirkimo laikams vertinti. Praktiškai pritaikius pasiūlytą daugiataikslės selektonovacijos modelį, gali būti skatinamas termoizoliacinių produktų ir investicijų efektyvesnis naudojimas.

## Ginamieji teiginiai

1. Daugiataikslės selektonovacijos integruotas sprendimo priėmimo vertinimas – vienas iš galimų efektyvių būdų nustatyti racionalų atitvarų termoizoliacinio sluoksnio storį, bendrąsias sąnaudas ir atsipirkimo laiką, atsižvelgiant į energijos šaltinio tipą, ekonominio vertinimo scenarijus ir klimato duomenis.
2. Vertinant atitvarų apšildymo efektyvumą ar spendžiant uždavinį, turintį didelį kiekį duomenų ir kai geriausio sprendimo ieškoma pagal daugelį tikslų, veiksminga naudoti daugiataiksliais metodais pagrįstą sprendimo priėmimo sistemą.
3. Pasiūlytas integruotas modelis sudaro galimybes sukurti sprendimų paramos sistemas, skirtas įvertinti racionalų apšildymo variantą jau projektavimo ir investicijų planavimo etapuose.

## Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbta dvylika mokslinių straipsnių: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)* sąrašą; aštuoni – konferencijos *ISI Proceedings* medžiagoje (Aviža *et al.* 2014, 2015); vienas – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose; vienas – Lietuvos konferencijų straipsnių rinkiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose mokslinėse konferencijose (trijose tarptautinėse ir vienoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų):

- 11-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern building materials, structures and techniques“ 2013 m. Vilniuje;
- 15-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2012 m. Vilniuje;
- The International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (INTEMS'2015), 2015 m. Panevėžyje;
- The International Conference (INBUILD'2015), Krokuvėje.

## **Disertacijos struktūra**

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir šaltinių bei autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba ir priedai.

Disertacijos apimtis su santrauka anglų kalba – 135 puslapiai (neįskaitant priedų), tekste panaudota 60 numeruotų formulių, 64 paveikslai ir 47 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 167 literatūros šaltiniai.



---

## **Pastato energinis naudingumas ir optimalios kainos nustatymas: mokslinis bei teisinis požiūris**

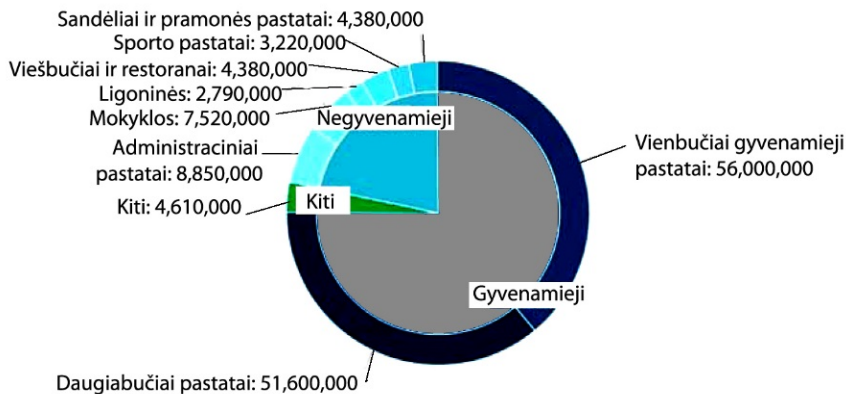
Pastatų sektoriuje yra didelis energijos taupymo potencialas, kadangi šioje šakoje suvartojama apie 40 % visos energijos kiekio (Kaynakli *et al.* 2012). Diskusija šiuo klausimu vyksta ir tarptautiniu mastu. Jungtinėse Amerikos Valstijose yra patvirtinta energijos taupymo deklaracija „The Energy Independence and Security Act of 2007“, kurioje numatyta sumažinti energijos vartojimą pastatų sektoriuje iki 2030 m.“ o visiškai įgyvendinti reformą iki 2050 metų (Marszal *et al.* 2012 ir kt.).

Dėl aplinkosauginių ir finansinių priežasčių energijos naudojimas bei valdymas aktualus ir Azijos regionui. Ypač didelis energijos suvartojimas pastatų sektoriuje yra Kinijoje. Iki 2006 m. Kinijoje pastatyta apie 40 mlrd. m<sup>2</sup> naudingo ploto pastatų ir šie skaičiai vis auga Kinijos tikslas – 20 proc. padidinti energijos vartojimo efektyvumą per 5 metų laikotarpį (Xiangfei *et al.* 2012 ir kt.).

Nuo 2020 m. gruodžio 31 d. Europos Sąjungos valstybės narės pagal Europos teisinio reglamentavimo dokumentus bei direktyvos 2010/31/EU reikalavimus turi užtikrinti, kad visi naujai statomi pastatai būtų beveik nulinės energijos pastatai. Tam tikslui pasiekti yra skirtas 4 metų laikotarpis (Marszal *et al.* 2012 ir kt.).

Lietuvoje energijos efektyvumo didinimas pastatų sektoriuje irgi yra didelis siekinys. Norint laiku pasiekti užsibrėžtus tikslus, t. y. pereiti nuo minimalių energinio naudingumo reikalavimų prie energijos beveik nevartojančių pastatų (NZEB) A++ klasės reikalavimų (žr. 1 pav.), svarbu racionaliai įvertinti klimato parametrų bei ekonomiškumo įtaką galutinių sprendimų priėmimui.

Tai ypač aktualūs uždaviniai gyvenamųjų pastatų sektoriuje. Pagal Europos pastatų naudingumo instituto (BPIE 2016) duomenis, gyvenamieji namai Lietuvoje apima per 75,05 % visų pastatų bendrojo ploto ir sudaro 143 mln. m<sup>2</sup>. Vienbučiai gyvenamieji pastatai, kurių plotas sudaro 56 mln. m<sup>2</sup>, užima daugiau kaip pusę šio ploto (žr. 1.1 pav.).



**1.1 pav.** Pastatų tipai Lietuvoje – bendras grindų plotas m<sup>2</sup>  
(Buildings Performance Institute Europe, 2011–2016)

**Fig. 1.1.** The building stock by building type in Lithuania – gross floor area m<sup>2</sup> (Buildings Performance Institute Europe, 2011–2016)

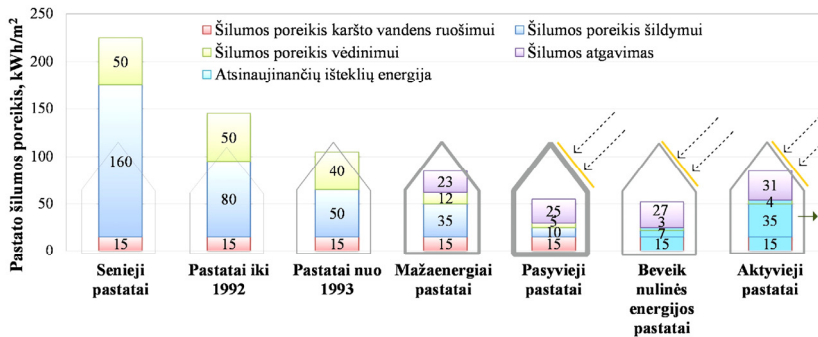
Šio skyriaus apibendrinta medžiaga paskelbta Avižos (2013b, 2015b ir 2015c), Avižos ir Balčienės *et al.* (2015d), Avižos ir Šleivienės *et al.* (2015h) publikacijose.

## 1.1. Mažai energijos naudojančio pastato samprata mokslinėje literatūroje

Mokslinėje literatūroje terminai „mažai energijos naudojančio pastatas“, „energija tausojantis pastatas“, „mažaenergis pastatas“, „pasyvusis namas“, „trijų litrų namas“, „beveik nulinės energijos pastatas“ (NZEB), „pliusinės energijos pastatas“,

„energijai neimlus namas“, „labai mažai energijos naudojantis pastatas“, „autonominis pastatas“ vartojami apibūdinti energetiškai efektyvius statinius. Daugelis šių terminų yra vartojami tik vienoje valstybėje, tačiau terminai „mažai energijos naudojantis pastatas“, „pasyvusis namas“ ir „beveik nulinės energijos pastatas“ taikomi plačiau. Europos valstybės turi nacionalinius jų apibrėžimus, tačiau tie patys terminai skirtingose šalyse skiriasi ne tik pagal turinį, bet ir pagal siekiamus tikslus (Džiugaitė-Tumėnienė 2015).

Europoje sugriežtinus reikalavimus energiniam naudingumui pastatuose užtikrinti, metinis pastato šilumos poreikis mažėja (žr. 1.2 pav.).



1.2 pav. Pastatų metinių šilumos poreikių kaita  
(Handel 2011, Džiugaitė-Tumėnienė 2015)

Fig. 1.2. The development of an annual heat demand of the buildings  
(Handel 2011, Džiugaitė-Tumėnienė 2015)

Daugiausia mokslinių tyrimų šiuo metu atliekama su beveik nulinės energijos pastatais (angl. *nerly zero-energy building* or *net zero energy building*). Mokslinėje literatūroje dar sutinkamos sąvokos: „nulinės emisijos“ arba „nulinio anglies dioksido pastatas“ (angl. *zero-emission, carbon neutral building*).

Energijos beveik nevartojantys pastatai – labai aukšto energinio naudingumo pastatai, kuriuose energijos sunaudojimas beveik lygus nuliui arba energijos sunaudojimas labai mažas; didžiąją sunaudojamos energijos dalį sudaro atsinaujinančių išteklių energija, įskaitant vietoje ar netoliese pagamintą atsinaujinančių išteklių energiją. Lietuvoje tokią kategoriją atitiktų A++ klasės pastatai.

## 1.2. Moksliniai tyrimai ir mažaaenergių pastatų projektavimo tendencijos Europoje

Šiame poskyryje yra atlikta Austrijos, Danijos, Vokietijos ir Lenkijos mokslinių tyrimų ir normavimo dokumentų nagrinėjama tema literatūros analizė.

AUSRIJA. Europos mastu daugiausiai mokslinių tyrimų pasyvių ir mažaenergių pastatų srityje yra atlikta Austijoje (*Österreichisches Institut für Bautechnik OIB* 2014). Pirmasis pasyvus vienbutis gyvenamasis pastatas šalyje pastatytas dar 1996 m. Vorarlberge. O jau nuo 2009 m. pagal pasyvių pastatų standartus pastatytų namų tankį, Austrija užima pirmąją vietą Pasaulyje (Lang 2010). Šalyje pastatų energinis naudingumas vertinamas pagal atskirą sertifikavimo sistemą, kuri yra griežtesnė už ES pastatų sertifikavimo reikalavimus (Klimaaktiv 2013). Šalyje pastatų energinio naudingumo sertifikatai skirstomi į 3 kategorijas: Auksinis (*Gold*), Sidabrinis (*Silber*) ir Bronzinis (*Bronze*). Minimalūs energinio naudingumo reikalavimai pateikti Bronzinio sertifikato standarte (OIB 2014). Naujiems pastatams projektuoti yra taikomi tokie standartai (žr. 1.1 lentelę):

- 1) „OIB-guidelines 6, 2011“ (OIS RL6, 2011). Šiame standarte nurodyti minimalūs energinio naudingumo reikalavimai;
- 2) „Klimaaktiv minimum criteria“ (Klimaaktiv building 2013). Šiame dokumente nurodyti „klimaaktiv“ standarto reikalavimai pastato atitvaroms ir inžinerinėms sistemoms;
- 3) „National Plan on Nearly Zero-Energy Buildings“ (NZEB 2020) – nacionalinis planas energijos beveik nevartojančių pastatų statybai: „NZEB 10“ – variantas su labiau apšildytomis atitvaromis ir „NZEB 16“ – variantas su tobulesnėmis inžinerinėmis sistemomis, kurios mažina CO<sub>2</sub> emisiją.

**1.1 lentelė.** Vienbučių pastatų projektavimo reikalavimai Austijoje (OIB 2014)

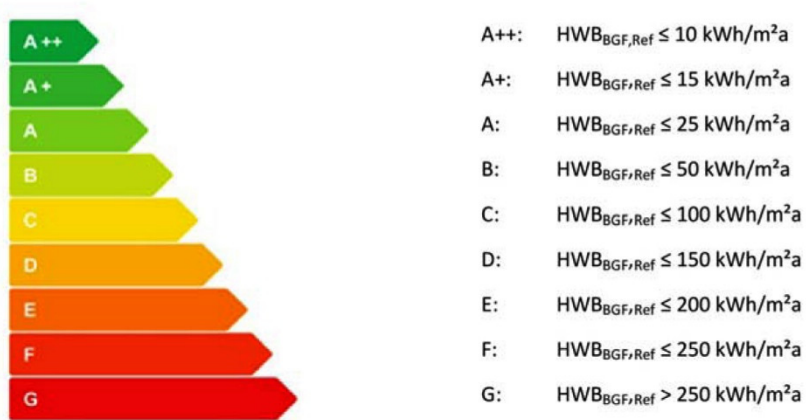
**Table 1.1.** The Design aspects of single-family buildings in Austria (OIB 2014)

Energinio naudingumo lygis	Matavimo vienetai	OIS RL6, 2011	klimaaktiv	NZEB 10	NZEB 16
Norminis stogo šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	0,2	0,08	0,1	0,17
Norminis sienų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	0,35	0,1	0,1	0,16
Norminis langų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	1,4	0,7	0,8	1,1
Norminis durų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	1,7	0,7	0,8	1,1
Norminis grindų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	0,4	0,1	0,2	0,2
CO <sub>2</sub> emisija	kg/(m <sup>2</sup> metai)	<30	<12	<24	<24

Austijoje (taip pat kaip ir Lietuvoje) pastatai klasifikuojami į 9 energinio naudingumo klases (Austian Energy Agency, AEA 2014): G, F, E, D, C, B, A, A+, A++. Aukščiausi reikalavimai keliami A++ klasės pastatams (žr. 1.3 pav.).



Pagal Austrijos energinio naudingumo strategiją 2020 metais pastato bendrame energijos balanse atsinaujinančiosios energijos dalis turės sudaryti ne mažiau kaip 15 proc. visos energijos (OIB 2014b). Tai ambicingas tikslas, todėl Austrijos mokslininkų tyrimų publikacijų ir techninių dokumentų skaičius nuolat auga. Keletas svarbių publikacijų pateikta 1.2 lentelėje.



1.3 pav. Pastatų energinio naudingumo klasifikacija Austrijoje (AEA 2014)

Fig. 1.3. Classification of energy performance of buildings (AEA 2014)

1.2 lentelė. Mokslinių tyrimų nagrinėjama tema publikacijos ir norminiai dokumentai Austrijoje (EPISCOPE 2014)

Table 1.2. Research publications and normative documents in Austria (EPISCOPE 2014)

Šaltinio nuoroda	Publikacijos pavadinimas originalo kalba	Pastabos lietuvių kalba
AEA, 2014	Amtmann, Maria/Altmann-Mavaddat, Naghmeh (2014): Eine Typologie österreichischer Wohnge-bäude, published by the Austrian Energy Agency, Vienna.	Pastatų klasifikacija Austrijoje
Lang, 2010	Lang, Günter (2010): 1000 Passivhäuser in Österreich. Passivhaus Objektdatenbak: Interaktives Dokumentations-Netzwerk Passivhaus.3. Doku-mentationsperiode 2006-2009. Wien, Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 85/2010.	1000 pasyvių pastatų tyrimo ataskaita
Klimaaktiv, 2013	Klimaaktiv Bauen und Sanieren ÖGUT GmbH (2013): klimaaktiv Bauen und Sanieren. Basiskri-terien 2013 für Wohngebäude und Dienstleis-tungsgebäude Neubau/Sanierung. Version 1.0, Juni 2013, Publisher: Bundesministeirum für Land- und Fortwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.	Klimaaktiv progamos tyrimų ataskaita

## 1.2 lentelės pabaiga

Šaltinio nuoroda	Publikacijos pavadinimas originalo kalba	Pastabos lietuvių kalba
AEA, 2013	Kratena, Kurt/ Angela Holzmann, Angela/ Barreto-Gomez, Leonardo/Baumann, Martin/ Bürbaumer, Heimo/The-nius, Gregor/Tretter, Herbert (2013): Bestimmungsgrößen für Energieeffizienz und –verbrauch in Österreichs Haushalten – Eine Komponentenerlegung.	Pastatų energinio naudingumo įtakos faktorių privačių gyvenamųjų pastatų projektavumui tyrimas
OIB, 2014a	OIB – Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem “Nationalen Plan” gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU. 28. March 2014.	Energijos beveik nevartojančių pastatų reikalavimų tyrimas: „Nacionalinis planas direktyvos 2010/31/EU tikslams pasiekti“.
OIB, 2014b	OIB – Richtline 6. Energieeinsparung und Wärme-schutz. Entwurf: Juni 2014	Energinio naudingumo projektavimas

DANIJA. Danijoje pastatų energinis naudingumas pradėtas reguliuoti jau nuo 1961 metų (*Danish building regulations BR61*). Nuo 2015 metų privalomi energinio naudingumo reikalavimai, kuriuose apibrėžiama, kad nuo 2020 metų energijos poreikis pastatuose turės būti ne didesnis kaip 20 kWh/m<sup>2</sup> per metus (BR2020). Danijoje nauji pastatai projektuojami pagal tris standartus (1.3 lentelė):

*Standard 2010* – šiame dokumente pateikti minimalūs energinio naudingumo reikalavimai.




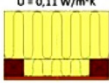
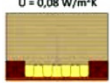
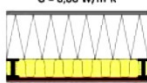
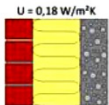
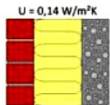
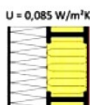
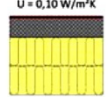
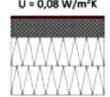




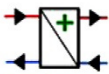
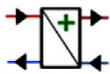




*Lavenergi 2015/ Low2015* – šiame dokumente nurodytas maksimalus pirminės energijos poreikis, taip pat nurodyta kad pirminės energijos poreikis turi sumažėti iki 50 proc. lyginant su 2006 metų reikalavimais.

*Bygningsklasse 2020/ NZEB2020 (BR2020)* – šiame dokumente nurodytas maksimalus pirminės energijos poreikis po 2020 m., taip pat nurodyta kad pirminės energijos poreikis turi sumažėti iki 75 proc. lyginant su 2006 metų reikalavimais.

Danijos mokslininkai aktyviai dalyvauja pastatų energinio efektyvumo tyrimuose. Nuo 2013 metų Danijos mokslininkai taip pat dalyvauja EPISCOPE projekte skirtam Europos šalių pastatų monitoringui vertinti (EPSICOPE 2014). Nuolat atnaujinami ir norminiai reikalavimai (1.4 lentelė ir 1.4 pav.).

**1.3 lentelė.** Vienbučių pastatų projektavimo reikalavimai Danijoje (BR10, 2014)  
**Table 1.3.** The Design aspects of single-family buildings in Denmark (BR10, 2014)

Energinio naudingumo lygis	Matavimo vienetai	Standard 2010	Lavenergi 2015	Bygnings-klasse 2020
Norminis stogo šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	0,11	0,08	0,06
Norminis sienų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	0,18	0,14	0,085
Norminis langų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	1,30	0,80	0,80
Norminis grindų šilumos perdavimo koeficientas U	W/(m <sup>2</sup> K)	0,10	0,08	0,06

Standartas	Standart 2010	Lavenergi 2015	Bygningsklasse 2020
			
Šildymo plotas, m <sup>2</sup>	178	170	122
Energijos poreikis, kWh/m <sup>2</sup>	50,5	34,0	17,6
Stogas			
Sienos			
Grindys			
Langai			
Šildymo sistema			
Vėdinimo sistema			

**1.4 pav.** Pastatų energinio naudingumo klasifikacija Danijoje (Sbi 2014)  
**Fig. 1.4.** Classification of energy performance of buildings in Denmark (Sbi 2014)

**1.4 lentelė.** Mokslinių tyrimų nagrinėjama tema publikacijos ir techniniai dokumentai Danijoje

**Table 1.4.** Research publications and normative documents on the topic in Denmark

Šaltinio nuoroda	Publikacijos pavadinimas originalo kalba	Pastabos lietuvių kalba
BE10	Aggerholm, S. & Grau, K. Bygningers energibehov – Beregningsvejledning (In Danish). SBI-Direction 213, 2. edition. Danish Building Research Institute, Aalborg University. Hørsholm, 2010.	Pastatų energinio naudingumo sertifikavimo tyrimai
BR10	Danish Building Regulations 2010 (BR10). Danish Energy Agency, Copenhagen, 2014.	Danijos pastatų energinio naudingumo projektavimo reikalavimai.
SBi 2014	SBi (ed.) (2014): BYGNINGSTYPOLOGIER	Pastatų klasifikacija Danijoje

VOKIETIJA. Pirmasis norminis dokumentas, reguliuojantis šiluminės atitvarų savybes Vokietijoje įsigaliojo jau nuo 1978 m. (Fingerling 1996). Vokietija pritaikė Švedijos standartų gerąją patirtį, o 1990 m. pastatė pirmąjį pasyvaus namo prototipą (Feist 2003). Dabartiniai pastatų energinio naudingumo standartai (*Energieeinsparverordnung*, EnEV2009) pradėti taikyti nuo 2009 metų.

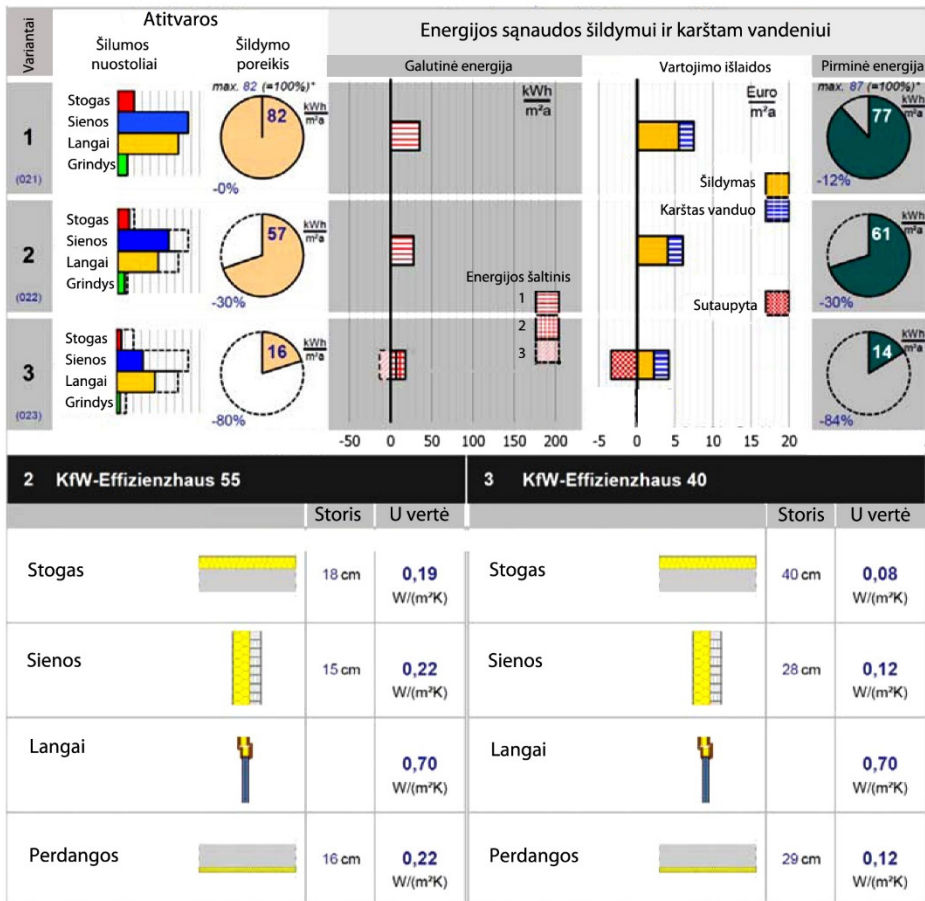
Vokietijoje pastatams projektuoti taikomi trys pagrindiniai standartai (1.5 lentelė):

- 1) *Mindestanforderung EnEV 2009/2014* – šiame dokumente pateikti minimalūs energinio naudingumo reikalavimai, taikomi iki 2016 metų.
- 2) *KfW Effizienzhaus 55/70* – šiame dokumente pateikti minimalūs energinio naudingumo reikalavimai galiosiantys nuo 2016 metų.
- 3) *KfW Effizienzhaus 40* – šiame dokumente pateikti pasyvaus pastato energinio naudingumo reikalavimai galiosiantys nuo 2020 metų (1.5 pav.).

**1.5 lentelė.** Vienbučių pastatų projektavimo reikalavimai Vokietijoje (EPISCOPE, 2014)

**Table 1.5.** Design of single-family buildings in Germany (EPISCOPE, 2014)

Atitvara	Gamtinės dujos			Biokuras			Elektra		
	EnEV	KfW 70	KfW 40	EnEV	KfW 70	KfW 40	EnEV	KfW 70	KfW 40
Norminis šilumos perdavimo koef., W/(m <sup>2</sup> K)									
Stogas	0,20	0,10	0,08	0,25	0,15	0,08	0,20	0,15	0,08
Sienos	0,28	0,14	0,12	0,33	0,18	0,12	0,24	0,18	0,12
Langai	1,30	0,70	0,70	1,30	1,10	0,70	1,30	1,10	0,70
Grindys	0,35	0,18	0,12	0,50	0,25	0,12	0,35	0,25	0,12



1.5 pav. Pastatų energinio naudingumo klasifikacija Vokietijoje (IWU 2015)

Fig. 1.5. Classification of energy performance of buildings in Germany (IWU 2015)

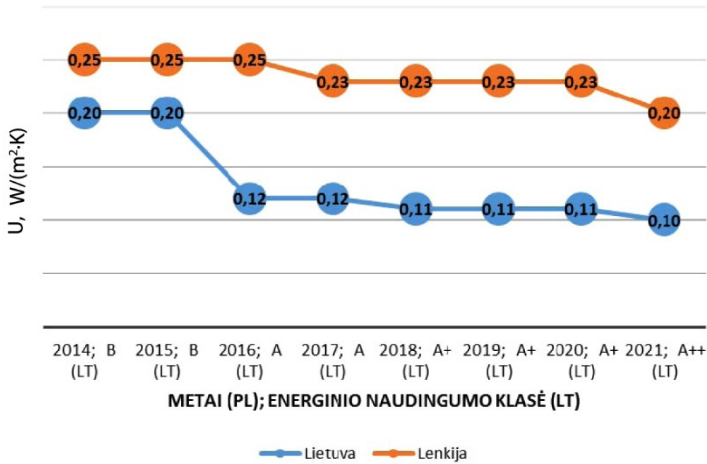
Vystant energinio naudingumo tyrimus bei siekiant 2020 metų strateginių tikslų, Vokietijoje nuolat didėja mokslinių publikacijų skaičius. Keletas jų pateiktos 1.6 lentelėje.

**1.6 lentelė.** Mokslinių tyrimų nagrinėjama tema publikacijos ir techniniai dokumentai Vokietijoje (EPISCOPE 2014)

**Table 1.6.** Research publications and normative documents in Germany (EPISCOPE 2014)

Šaltinio nuoroda	Publikacijos pavadinimas originalo kalba	Pastabos lietuvių kalba
BPIE/IWU 2013	Enseling, Andreas; Loga, Tobias: Implementing the cost-optimal methodology in EU countries - Case Study Germany; editor: BPIE, Brussels / Belgium 2013.	Optimalios kainos taikymo metodologija ir tyrimai ES šalyse
DIN V 4108-6 / 4701-10	Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN V 4108-6 – „Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs“; 2003-06, geändert durch Berichtigung 1 2004-03.	Energijos poreikio gyvenamiesiems pastatams skaičiavimo schema. Vokiškas standartas
Feist 2003	Feist, Wolfgang: Das Passivhaus: Die Optimierung energiebewusster Bauweisen. VDE Verlag (Germany), 2003.	Pasyvių pastatų projektavimo principai.
Fingerling 1996	Fingerling, Anne: Eine Geschichte der Niedrig-energiehäuser bis zum Passivhaus; IWU, Darmstadt 1996.	Mažai energijos vartojančių pastatų ir pasyvių pastatų vystymosi istorija Vokietijoje.
IWU 2013a	Diefenbach, Nikolaus; v. Malottki, Christian; Enseling, Andreas; Loga, Tobias; Cischinsky, Holger; Stein, Britta; Hörner, Michael; Grafe, Michael: Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich – Zielerreichungsszenario. Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): BMVBS-Online-Publikation 03/2013.	Scenarijų analizės tyrimai gyvenamosios paskirties pastatų srityje.
IWU 2014a	Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf: Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz von typischen Wohngebäuden; second edition, IWU, Darmstadt / Germany, draft version October 2014, previously unreleased.	Pastatų klasifikacija Vokietijoje.
Zirngibl 2014	Zirngibl, Johann: Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) in the CEN draft standard; REHVA Journal – May 2014.	Energijos beveik nevartojančių pastatų tyrimai, atsižvelgiant į norminių dokumentų reikalavimus.

LENKIJA. Energinio naudingumo reikalavimai Lenkijoje apibrėžti norminiame dokumente Dz. U. z 2015 r. poz. 376. Pastatai nėra skirstomi į klases (Pogorzelski 2009), tačiau yra apibrėžtos maksimaliai leidžiamos skaičiuojamosios energijos sąnaudos kvadratiniam metre pastato naudingojo ploto per metus, kWh/(m<sup>2</sup>·metai). Taip pat atitvaroms keliami norminiai reikalavimai. Pavyzdžiui, palyginus Lietuvos ir Lenkijos sienų šilumos perdavimo koeficientų norminius reikalavimus, Lietuvos reikalavimai yra du kartus griežtesni (Aviža *et. al.* 2015). Ypač didelis šuolis tarp *B* ir *A* energinio naudingumo klasių reikalavimų (žr. 1.6 pav.).



**1.6 pav.** Sienų norminiai šilumos perdavimo koeficientai Lietuvoje ir Lenkijoje  
**Fig. 1.6.** Normative value of thermal transmittance coefficients of walls in Lithuania and Poland

Taigi atlikus Europos šalių mokslinių tyrimų literatūros analizę, galima teigti, jog kiekvienoje šalyje yra istoriškai susiklostęs skirtingas požiūris į energinio naudingumo vertinimą, tačiau visų šalių energijos efektyvumo didinimo strategijos numato energijos beveik nevartojančių pastatų (NZEB) projektavimo būtinumą.

Mokslininkai (Attia *et al.* 2012) siūlo įvairias koncepcijas NZEB pastatams projektuoti (žr. 1.7 lentelę).

Sprendžiant pastato planavimo ir projektavimo problemas, mokslininkai dažnai taiko daugiakriterius optimizavimo metodus. Pagrindinis optimizavimo tikslas – rasti minimalią arba maksimalią tikslo funkcijos vertę, pasirinkus atitinkamą skaičių kintamųjų. 1.8 lentelėje pateikiami mažoenergių pastatų optimizavimo sprendimams taikomi būdingi kriterijai ir tikslo funkcijos.

**1.7 lentelė.** Šeši pagrindiniai NZEB projektavimo principai

**Table 1.7.** The six main building design aspects of NZEBs design

Principas	Paiškinimas
1. Daugiakriteris balansas	Yra keletas NZEB apibrėžimų, kurie grindžiami energijos, aplinkosaugos ir ekonominių priemonių pusiausvyra. Todėl NZEB modeliavimo įrankiai turi turėti galimybę sudaryti daugiakriterį balansą.
2. Komforto lygis ir klimatas	NZEB pastatas labai jautrus klimato faktoriams. Vadinasi projektuojant NZEB pastatą labai svarbu įvertinti terminio komforto lygį. Todėl įvairūs modeliai gali padėti išspręsti šia problemą.
3. Pasyvios strategijos	Pasyvios strategijos yra pamatinės projektuojant NZEB pastatus, įskaitant natūralų apšvietimą, vėdinimą, šiluminę inerciją ir apsaugos nuo saulės priemones.
4. Energijos efektyvumas	Pagal apibrėžimą, NZEB turi būti labai aukšto energinio naudingumo pastatas. Tai rodo, kad pastatas turi tenkinti visus energijos vartojimo efektyvumo standartus, atsižvelgiant į pastato atitvarų racionalų termoizoliacinio sluoksnio storį, sandarumo reikalavimus bei galimybes sumažinti dirbtinį apšvietimą.
5. Inžinerinės sistemos, naudojančios atsinaujinančius energijos išteklius (ISNAEI)	ISNAEI yra integrali (neatskiriama) NZEB pastato dalis. Todėl jau projektavimo stadijoje, reikėtų atsižvelgti į saulės kolektorių reikalingą plotą, išdėstymą, posvyrio kampą ir pan.
6. Inovaciniai sprendimai ir technologijos	Suprojektuoti NZEB pastatą – didelis tikslas (iššūkis), todėl tokiame tikslui pasiekti reikalingi novatoriški sprendimai ir technologijos.

**1.8 lentelė.** Pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemoms optimizuoti taikomi kriterijai ir tikslo funkcijos (Džiugaitė-Tumėnienė 2015)

**Table 1.8.** Criteria and objective functions applied to the optimization of the buildings and their supply energy systems (Džiugaitė-Tumėnienė 2015)

Energinio efektyvumo kriterijus	Poveikio aplinkai kriterijus	Ekonominio efektyvumo kriterijus	Komforto kriterijus	Funkcionalumo kriterijus
a) Pirminės energijos poreikio mažinimas	a) Šiluminio efekto sukeliančių dujų emisijų į aplinką mažinimas	a) Bendrų išlaidų per pastato gyvavimo trukmę mažinimas	a) Šiluminio komforto didinimas	a) Sistemos funkcionalumo didinimas
b) Aprūpinimo energija sistemos/ energinio efektyvumo didinimas	b) Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo didinimas	b) Investicijų atsipirkimo laiko trumpinimas	b) Oro kokybės didinimas	b) Sistemos lankstumo didinimas



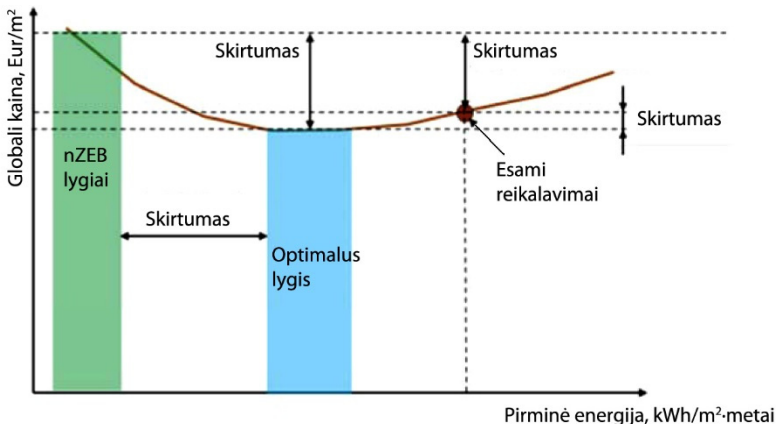
1.8 lentelės pabaiga

Energinio efektyvumo kriterijus	Poveikio aplinkai kriterijus	Ekonominio efektyvumo kriterijus	Komforto kriterijus	Funkcionalumo kriterijus
c) Aprūpinimo energija sistemos valdymo ir reguliavimo didinimas		c) Aprūpinimo energija sistemos veikimo ir eksploatacinių metinių išlaidų mažinimas	c) Natūralaus ir dirbtinio apšvietimo efektyvus derinimas	c) Patogumo eksploatuoti didinimas
d) Atsinaujinančių išteklių naudojimo didinimas			d) Triukšmo lygio mažinimas	

Norint efektyviai, tvariai ir racionaliai naudoti energiją bei optimizuoti bendrąsias išlaidas, Europos mokslininkai (BPIE 2013) pastatų energinio naudingumo vertinime identifikuoja tris probleminės sritis (žr. 1.7 pav.):

1. Finansai: skirtumas tarp optimalios kainos ir nZEB kainos;
2. Energinis naudingumas: pirminės energijos poreikio skirtumas tarp optimalios ir nZEB kainų lygio;
3. Aplinkosauga: anglies dioksido kiekio skirtumas tarp optimalios ir nZEB kainų lygio (ES tikslas – iki 2050 m. pastatai būtų beveik nulinės emisijos  $<3 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{metai}$ ).

Norint kompleksiškai įvertinti skirtingus tikslus bei susijusias problemas, reikalingas daugiataksių sprendimo priėmimo metodų taikymas.



1.7 pav. Probleminės zonos: finansų, energijos ir aplinkosauginių reikalavimų (BPEI 2013)

Fig. 1.7. Example of financial, energy and environmental gaps (BPEI 2013)

### **1.3. Pastatų energinio naudingumo ir optimalios kainos nustatymo reglamentavimas Europos Sąjungoje**

Energijos vartojimo sumažinimas ir energijos nuostolių pašalinimas tampa vis svarbesniais ES tikslais (Mellar 2015). ES lyderiai 2007 m. patvirtino tikslą iki 2020 m. metinį Sąjungoje suvartojamos energijos kiekį sumažinti 20 %. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės vis dažniau laikomos ne tik tvaraus energijos tiekimo, šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimo, tiekimo saugumo ir importo išlaidų mažinimo užtikrinimo priemonėmis, bet ir Europos ekonomikos konkurencingumo skatinimo priemonėmis. 2014 m. kovo 20 ir 21 d. Europos Vadovų Taryba pabrėžė energijos vartojimo efektyvumo svarbą mažinant energijos kainą ir energetinę priklausomybę. ES patvirtino būtiniausius energijos vartojimo efektyvumo standartus ir taisykles, susijusias su produktų, paslaugų ir infrastruktūros ženkliniu ir ekologiniu projektavimu. Šiomis priemonėmis siekiama padidinti efektyvumą visuose energijos grandinės etapuose, pradedant nuo energijos tiekimo ir baigiant vartotojo naudojama energija.

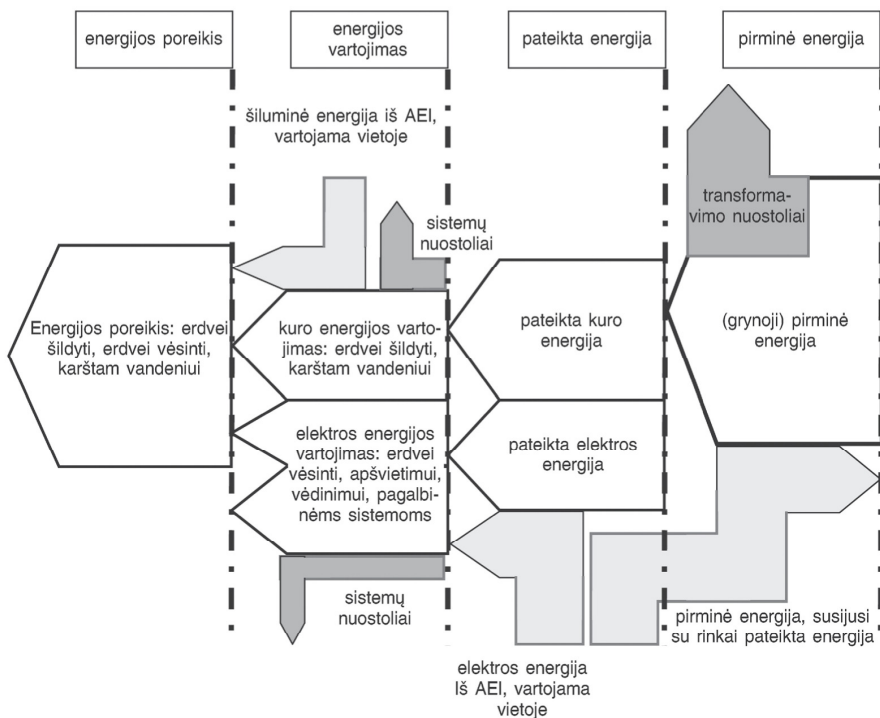
Direktyvoje 2010/31/EB dėl energinio pastatų naudingumo numatomas metodas, skirtas energiniam pastatų naudingumui apskaičiuoti, minimalūs naujų ir esamų pastatų reikalavimai ir pastatų energinis sertifikavimas. Taip pat joje numatoma, kad iki 2020 m. gruodžio 31 d. visi nauji pastatai privalo būti beveik nulinės energijos pastatai (nZEB).

Pagal ES direktyvos reglamento (ES) Nr. 244/2012 gaires, energinį naudingumą rekomenduojama skaičiuoti tokiais etapais:

1. Pastato grynųjų šiluminės energijos poreikių (žr. 1.8 pav.), reikalingų vartotojo poreikiams patenkinti, apskaičiavimas. Energijos poreikis žiemą apskaičiuojamas kaip energijos nuostoliai per atitvaras ir dėl vėdinimo, atėmus pastato viduje atgaunamą energiją (iš prietaisų, apšvietimo sistemų ir pastate esančių asmenų) ir natūraliai atgaunamą energiją (pasivys šildymas naudojant saulės energiją, pasivys vėsinimas, natūralūs vėdinimas ir pan.).
2. Atsinaujinančiais ištekliais grindžiamos šiluminės energijos, pagamintos (pvz., naudojant saulės energijos kolektorius) ir naudojamos vietoje, kiekio atėmimas iš pirmojo etapo.
3. Energijos vartojimo kiekvienoje galutinio vartojimo srityje (erdvės šildymo ir vėsinimo, karšto vandens ruošimo, apšvietimo, vėdinimo) ir pagal kiekvieną energijos nešiklį (elektros energija, kuras) apskaičiavimas, atsižvelgiant į generavimo, paskirstymo, spinduliavimo ir valdymo sistemų charakteristikas (sezoninį efektyvumą).

4. Elektros energijos pagamintos iš atsinaujinančių išteklių, pagamintos (pvz., naudojant fotovoltines plokštes) ir naudojamos vietoje, kiekio atėmimas iš suvartotos elektros energijos kiekio.
5. Bendros suvartotos energijos, kuri pagaminta ne iš atsinaujinančių išteklių, apskaičiavimas pagal kiekvieną energijos nešiklį.
6. Pirminės energijos, siejamos su pateikta energija, skaičiavimas, taikant nacionalinius konvertavimo koeficientus (žr. 2.12 lentelę).
7. Pirminės energijos, siejamos su rinkai pateikta energija (pvz., pagaminta iš atsinaujinančių išteklių ar vietoje veikiančių kogeneracijos įrenginių), apskaičiavimas.
8. Pirminės energijos apskaičiavimas kaip dviejų pirmiau nurodytų kiekių šešto ir septinto punkto skirtumas.

Pagal Direktyvos 2010/31/ES III priedą ir reglamento I priedo 4 skirsnį optimalumo sąnaudų atžvilgiu skaičiavimo metodika grindžiama gryniosios dabartinės vertės (bendrų išlaidų) metodika (Fabbri *et al.* 2013).



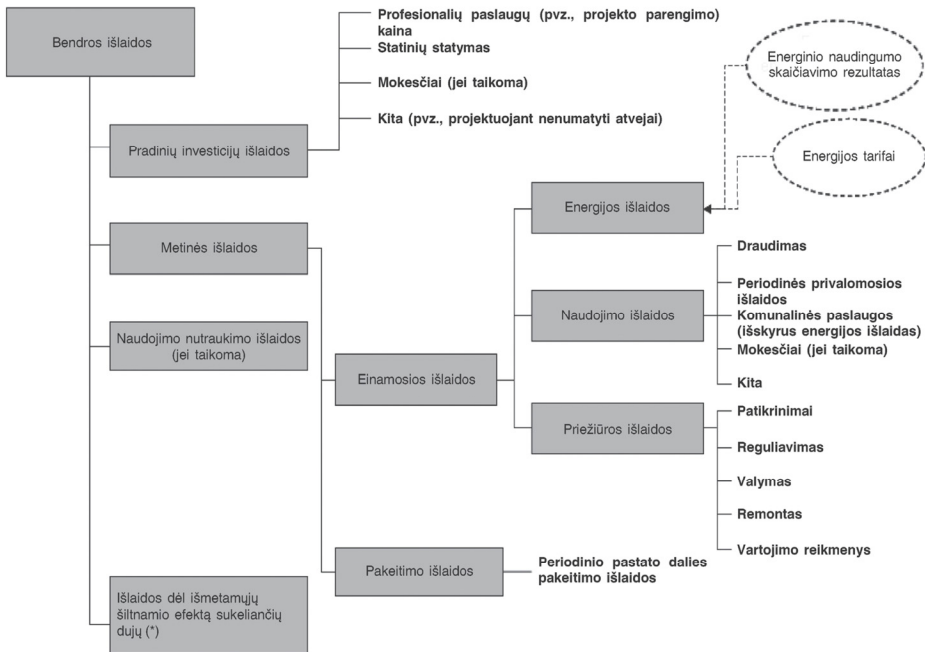
1.8 pav. Energijos poreikio apskaičiavimo schema (LST EN 15603:2008)

Fig. 1.8. Calculation scheme of Energy needs (LST EN 15603:2008)

Terminas „bendros išlaidos“ paimtas iš standarto EN 15459 ir atitinka specializuotoje literatūroje vartojamą sąvoką „išlaidų per gyvavimo ciklą analizė“.

Apskaičiuojant bendras išlaidas (žr. 1.9 pav.) atsižvelgiama į pradines investicijas, kiekvienų metų sumines metines išlaidas, galutinę vertę ir prireikus naudojimo nutraukimo išlaidas – visos jos susiejamos su laikotarpio pradžios metais. Makroekonomikos lygmeniu skaičiuojant optimalumą sąnaudų atžvilgiu bendros išlaidos turi būti papildytos nauja kategorija – išlaidų dėl išmetamųjų šiltnamio efektą sukeliančių dujų, kurios apibrėžiamos kaip žalos, padarytos aplinkai dėl pastatuose suvartojamos energijos išmetamo CO<sub>2</sub>, pinigine vertė.

Europos direktyvos rekomenduoja atlikti mikroekonominį (finansinį) ir makroekonominį skaičiavimus, įvertinant ilgalaikes energijos kainų prognozes (kurias mas scenarijų sistemas).



(\*) Tik skaičiuojant makroekonomikos lygmeniu.

**1.9 pav.** Išlaidų skirstymas pagal kategorijas pagal metodikos principus (ES reglamentas Nr. 244/2012)

**Fig. 1.9.** Cost categorisation according to the framework methodology (EU Regulation Nr. 244/2012)

Pagal Europos pastatų instituto (BPIE 2013) duomenis, sąnaudų atžvilgiu optimali kaina (grynoji dabartinė vertė) gali būti nustatoma etapais (žr. 1.11 pav.):

1 etapas. Pastato tipo parinkimas: nauja statyba ar esamas pastatas.

2 etapas. Įvairių energinio naudingumo klasių (paketų arba variantų) parinkimas (esami ir būsimi energinio naudingumo reikalavimai, įskaitant NZEB pastatus).

3 etapas. Pradinių duomenų ir apribojimų parinkimas: techniniai duomenys (klimato, geometrijos, inžinerinių sistemų ir kt. parametrai) ir ekonominiai duomenys (investicijų kaina, tikroji diskonto norma, energijos kaina ir pan.).

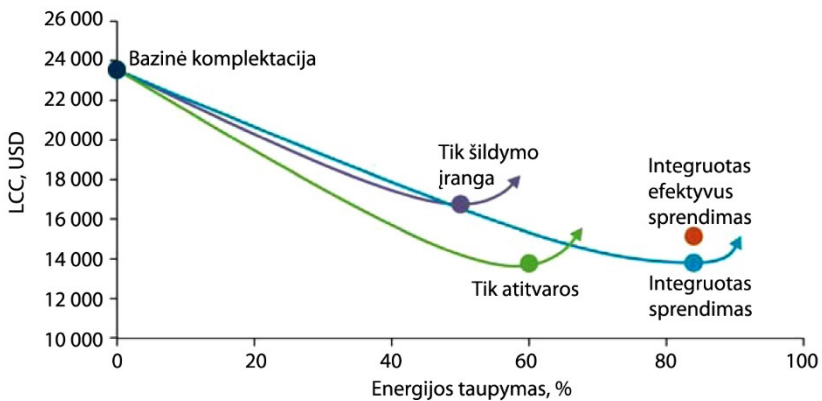
4 etapas. Kiekvieno varianto (paketo) energinio naudingumo skaičiavimas ir gautų duomenų panaudojimas grynosios dabartinės vertės finansiniam naudingumo skaičiavimui.

5 etapas. Sąnaudų atžvilgiu optimalios kainos nustatymas, atsižvelgiant į priemonės gyvavimo ciklą.

6 etapas. Ekonominio optimalumo ribų nustatymas.

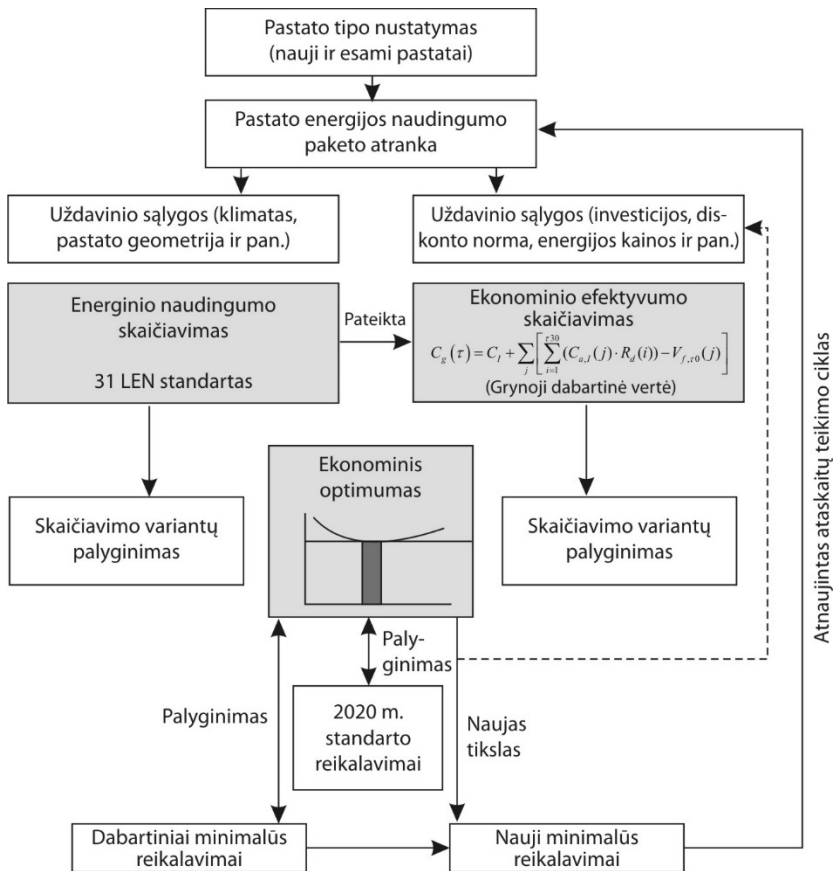
7 etapas. Gautų rezultatų palyginimas su minimaliais energinio naudingumo reikalavimais bei siūlymas nustatyti naujus minimalius energinio naudingumo reikalavimus.

Pastato išorės atitvarų racionalus apšiltinimas daro didžiulę įtaką galutiniam energijos poreikiui ir sutaupymui (1.10 pav.). Iki 60 % bendrų išlaidų per pastato gyvavimo trukmę (LLC – angl. *life-cycle cost*) galima sutaupyti tik racionaliai apšildžius pastato išorės atitvaras (IEA 2016).



1.10 pav. Sprendimai, darantys įtaką energijos taupymui (IEA 2016)

Fig. 1.10. Decisions affecting energy savings (IEA 2016)



1.11 pav. Optimalios kainos metodologijos įgyvendinimo etapai (BPIE 2010, 2013)

Fig. 1.11. Implementation steps of cost-optimal methodology (BPIE 2010, 2013)

## 1.4. Vienbučių gyvenamųjų pastatų energinio naudingumo projektavimo praktika Lietuvoje

Tradiciniai naujos statybos ir modernizuojami vienbučiai gyvenamieji pastatai Lietuvoje statomi bei projektuojami laikantis statybos įstatymo bei statybos techninio reglamento STR 2.05.01:2013 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas“ reikalavimų.

Pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančius statybos norminius dokumentus bei statybos techninio reglamento STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ nuostatas pastatai klasifikuojami į 9 energinio naudingumo klases: A++, A+, A, B, C, D, E, F, G (žr. 1 pav.). A++ klasė laikoma aukščiausia, ji nurodo energijos beveik nevartojantį pastatą (jo dalį). Modernizuojamų pastatų energinio naudingumo klasė turi būti nemažesnė kaip „C“. Naujai pastatytų pastatų (pastato dalių) energinio naudingumo klasė nuo 2016 m. lapkričio 1 d. turi būti ne žemesnė kaip A.

Pastato (jo dalies) energinio naudingumo klasė nustatoma pagal šių pastato rodiklių vertes: pastato atitvarų skaičiuojamųjų savitųjų šilumos nuostolių; pastato sandarumo; mechaninio vėdinimo su rekuperacija sistemos techninių rodiklių; pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklio  $C_1$  vertę, apibūdinančią pirminės neatsinaujinančiosios energijos vartojimo efektyvumą šildymui, vėdinimui, vėsinimui ir apšvietimui; pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklio  $C_2$  vertę, apibūdinančią pirminės neatsinaujinančiosios energijos vartojimo efektyvumą karštam buitiniam vandeniui ruošti; pastate sunaudojamos energijos dalį iš atsinaujinančių išteklių.

Statybos techniniame reglamente STR 2.05.01:2013 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas“ pateikti energinio naudingumo reikalavimai įvairios energinio naudingumo klasės pastatams (žr. 1.9 ir 1.10 lentelės).

**1.9 lentelė.** Norminiai energijos vartojimo efektyvumo rodiklių reikalavimai (STR 2.05.01:2013)

**Table 1.9.** Normative energy efficiency ratio requirements (STR 2.05.01:2013)

Pastato energinio naudingumo klasė	Energijos vartojimo efektyvumo rodiklis $C_1$	Energijos vartojimo efektyvumo rodiklis $C_2$
A++	$C_1 < 0,25$	$C_2 \leq 0,70$
A+	$0,25 \leq C_1 < 0,375$	$C_2 \leq 0,80$
A	$0,375 \leq C_1 < 0,5$	$C_2 \leq 0,85$
B	$0,5 \leq C_1 < 1$	$C_2 \leq 0,99$
C	$1 \leq C_1 < 1,5$	-
D	$1,5 \leq C_1 < 2$	-
E	$2 \leq C_1 < 2,5$	-
F	$2,5 \leq C_1 < 3$	-
G	$C_1 \geq 3$	-

**1.10 lentelė.** Norminiai energinio naudingumo reikalavimai (STR 2.05.01:2013)  
**Table 1.10.** Normative energy efficiency ratio requirements (STR 2.05.01:2013)

Pastatų energinio naudingumo klasė	Reikalavimai atitinkamos energinio naudingumo klasės pastatams
D klasės pastatai	Pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklio vertė turi tenkinti sąlygą: $1,5 \leq C_1 < 2$ .
	Pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai $H_{env(D)}$ (W/K) negali būti didesni už norminius $H_{N,env(D)}$ (W/K).
C klasės pastatai	Pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklio vertė turi tenkinti sąlygą: $1 \leq C_1 < 1,5$ .
	Pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai $H_{env(C)}$ (W/K) negali būti didesni už norminius $H_{N,env(C)}$ (W/K).
	Norminė oro apykaitos $n_{50,N}$ (1/h) vertė esant 50 Pa slėgių skirtumui turi būti ne didesnė už 2,0.
B klasės pastatai	Pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklių vertės turi tenkinti sąlygas: $0,5 \leq C_1 < 1$ ; $C_2 \leq 0,99$
	Pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai $H_{env(B)}$ (W/K) negali būti didesni už norminius $H_{N,env(B)}$ (W/K).
	Norminė oro apykaitos $n_{50,N}$ (1/h) vertė esant 50 Pa slėgių skirtumui turi būti ne didesnė už 1,5.
	Šilumos perdavimo koeficiento norminės reikšmės: pertvarų $U_2 = 0,67$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)); tarpaukštinių perdangų $U_2 = 0,53$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)). Skiriančių naujus pastatus su atskiromis (autonominėmis) šildymo sistemomis arba atskiromis (autonominėmis) energijos vartojimo pastatui šildyti apskaitomis.
	Šiluminės energijos sąnaudos pastatui šildyti turi būti ne didesnės už $383 \cdot A_p^{-0,22}$ kWh/(m <sup>2</sup> ·metai)
A klasės pastatai	Pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklių vertės turi tenkinti sąlygas: $0,375 \leq C_1 < 0,5$ ; $C_2 \leq 0,85$ .
	Pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai $H_{env(A)}$ (W/K) negali būti didesni už norminius $H_{N,env(A)}$ (W/K).
	Norminė oro apykaitos $n_{50,N}$ (1/h) vertė esant 50 Pa slėgių skirtumui turi būti ne didesnė už 1,0.
	Šilumos perdavimo koeficiento norminės reikšmės: pertvarų $U_2 = 0,40$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)); tarpaukštinių perdangų $U_2 = 0,33$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)). Skiriančių naujus pastatus su atskiromis (autonominėmis) šildymo sistemomis arba atskiromis (autonominėmis) energijos vartojimo pastatui šildyti apskaitomis.
	Šiluminės energijos sąnaudos pastatui šildyti turi būti ne didesnės už $175 \cdot A_p^{-0,25}$ kWh/(m <sup>2</sup> ·metai).
	Jei pastate (jo dalyje) įrengta mechaninio vėdinimo su rekuperacija sistema, rekuperatoriaus naudingumo koeficientas turi būti ne mažesnis už 0,65, o rekuperatoriaus ventiliatoriaus naudojamas elektros energijos kiekis neturi viršyti 0,75 Wh/m <sup>3</sup> .



1.10 lentelės pabaiga

Pastatų energinio naudingumo klasė	Reikalavimai atitinkamos energinio naudingumo klasės pastatams
A+ klasės pastatai	Pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklių vertės turi tenkinti sąlygas: $0,25 \leq C_1 < 0,375$ ; $C_2 \leq 0,80$ .
	Pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai $H_{env(A+)}$ (W/K) negali būti didesni už norminius $H_{N,env(A+)}$ (W/K).
	Norminė oro apykaitos $n_{50,N}$ (1/h) vertė esant 50 Pa slėgių skirtumui turi būti ne didesnė už 0,6.
	Šilumos perdavimo koeficiento norminės reikšmės: pertvarų $U_2 = 0,37$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)); tarpaukštinių perdangų $U_2 = 0,30$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)). Skiriančių naujus pastatus su atskiromis (autonominėmis) šildymo sistemomis arba atskiromis (autonominėmis) energijos vartojimo pastatui šildyti apskaitomis.
	Šiluminės energijos sąnaudos pastatui šildyti turi būti ne didesnės už $170 \cdot A_p^{-0,30}$ kWh/(m <sup>2</sup> ·metai).
	Jei pastate (jo dalyje) įrengta mechaninio vėdinimo su rekuperacija sistema, rekuperatoriaus naudingumo koeficientas turi būti ne mažesnis už 0,80, o rekuperatoriaus ventiliatoriaus naudojamas elektros energijos kiekis neturi viršyti 0,55 Wh/m <sup>3</sup> .
A++ klasės pastatai	Pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklių vertės turi tenkinti sąlygas: $C_1 < 0,25$ ; $C_2 \leq 0,70$ .
	Pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai $H_{env(A++)}$ (W/K) negali būti didesni už norminius $H_{N,env(A++)}$ (W/K).
	Norminė oro apykaitos $n_{50,N}$ (1/h) vertė esant 50 Pa slėgių skirtumui turi būti ne didesnė už 0,6.
	Šilumos perdavimo koeficiento norminės reikšmės: pertvarų $U_2 = 0,33$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)); tarpaukštinių perdangų $U_2 = 0,27$ (W/(m <sup>2</sup> ·K)). Skiriančių naujus pastatus su atskiromis (autonominėmis) šildymo sistemomis arba atskiromis (autonominėmis) energijos vartojimo pastatui šildyti apskaitomis.
	Šiluminės energijos sąnaudos pastatui šildyti turi būti ne didesnės už $173 \cdot A_p^{-0,36}$ kWh/(m <sup>2</sup> ·metai).
	Jei pastate (jo dalyje) įrengta mechaninio vėdinimo su rekuperacija sistema, rekuperatoriaus naudingumo koeficientas turi būti ne mažesnis už 0,90, o rekuperatoriaus ventiliatoriaus naudojamas elektros energijos kiekis neturi viršyti 0,45 Wh/m <sup>3</sup> .
	Didžiąją sunaudojamos energijos dalį turi sudaryti atsinaujinančių išteklių energija.

Skirstant pastatus į energinio naudingumo klases yra reglamentuojami išorės atitvarų (stogo, sienų, grindų ant grunto, perdangų besiribojančių su išore, langų bei durų) šilumos perdavimo koeficientai ( $U_N$ , W/(m<sup>2</sup>·K)) bei savitieji šilumos nuostoliai ( $H_N$ , W/K), kurie taip pat tiesiogiai priklauso nuo šilumos perdavimo

koeficientų. Gyvenamosios paskirties pastatų norminiai šilumos perdavimo koeficientai pateikti 1.11 lentelėje.

**1.11 lentelė.** Vienbučio gyvenamojo pastato norminiai šilumos perdavimo koeficientai  
**Table 1.11.** Normative value of thermal transmittance coefficients of a single-apartment residential buildings

Energinio naudingumo klasė	Stogo šilumos perdavimo koeficientas $U_{N,r}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	Sienų šilumos perdavimo koeficientas $U_{N,w}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	Grindų ant grunto šilumos perdavimo koeficientas $U_{N,fg}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)
D	$0,24 \cdot \kappa$	$0,35 \cdot \kappa$	$0,33 \cdot \kappa$
C/B	$0,16 \cdot \kappa$	$0,20 \cdot \kappa$	$0,25 \cdot \kappa$
A	$0,10 \cdot \kappa$	$0,12 \cdot \kappa$	$0,14 \cdot \kappa$
A+	$0,09 \cdot \kappa$	$0,11 \cdot \kappa$	$0,12 \cdot \kappa$
A++	$0,08 \cdot \kappa$	$0,10 \cdot \kappa$	$0,10 \cdot \kappa$

Temperatūros pataisa  $\kappa = 20 / (\theta_i - \theta_e)$ , čia  $\theta_i$  – vidaus temperatūra šildymo sezono metu, priimta  $\theta_i = 20$  °C;  $\theta_e$  – vidutinė šildymo sezono išorės oro temperatūra.

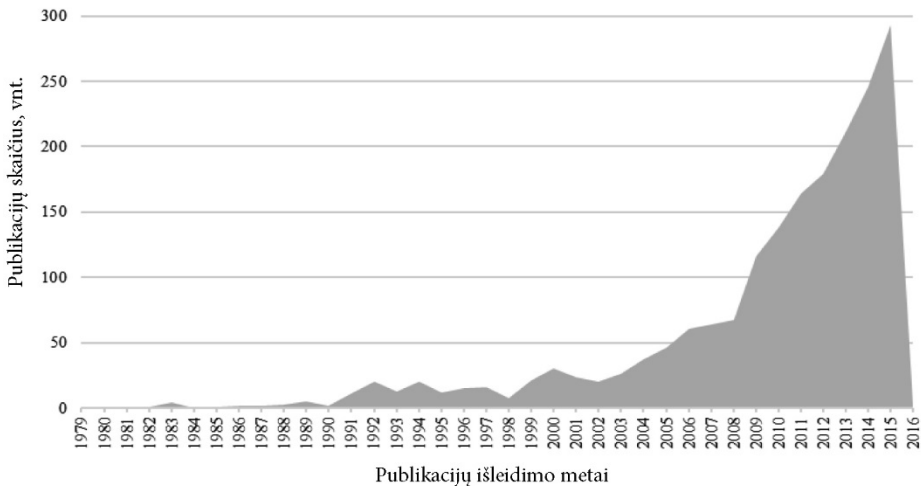
Šiame darbe bus vertinami tik vienbučio gyvenamojo pastato išorės atitvarų (stogo, sienų ir grindų ant grunto) energinio naudingumo reikalavimai, tariant kad visi kiti pastato energinio naudingumo parametrai (1.10 lentelės techninės sąlygos, inžinerinės sistemos ir pan.) yra fiksuoti (nekinta ir tinka visoms atitvarų energinio naudingumo klasėms vertinti).

## 1.5. Daugiatikslių sprendimo priėmimo metodų parinkimas kompleksiniams uždaviniams spręsti

Vienkriteriais vertinimo metodais neįmanoma išspręsti uždavinių, kuriuose reikia vertinti daugelį tikslų (Ustinovičius 2007), todėl daugiatisliai sprendimo priėmimo metodai vis dažniau taikomi statybos inžinerijos bei investicijų skaičiavimo kompleksiniams uždaviniams spręsti (1.12 pav.).

Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai (angl. *Multiple Criteria Decision Making* arba MCDM methods) yra skirstomi į dvi grupes:

- Daugiatikslius (angl. *Multiple Decision Making* arba MODM), kai nagrinėjamos vektorinio maksimumo problemos;
- Daugiarodiklius (angl. *Multiple Attribute Decision Making* arba MADM), kai ieškoma geriausio sprendimo tarp keleto galimų ir tikslingų diskrečių sprendinių.



**1.12 pav.** MCDM metodų taikymas publikacijose pagal jų išleidimo metus (ISI Web of Science)

**Fig. 1.12.** Distribution of MCDM articles based on year of publication (ISI Web of Science)

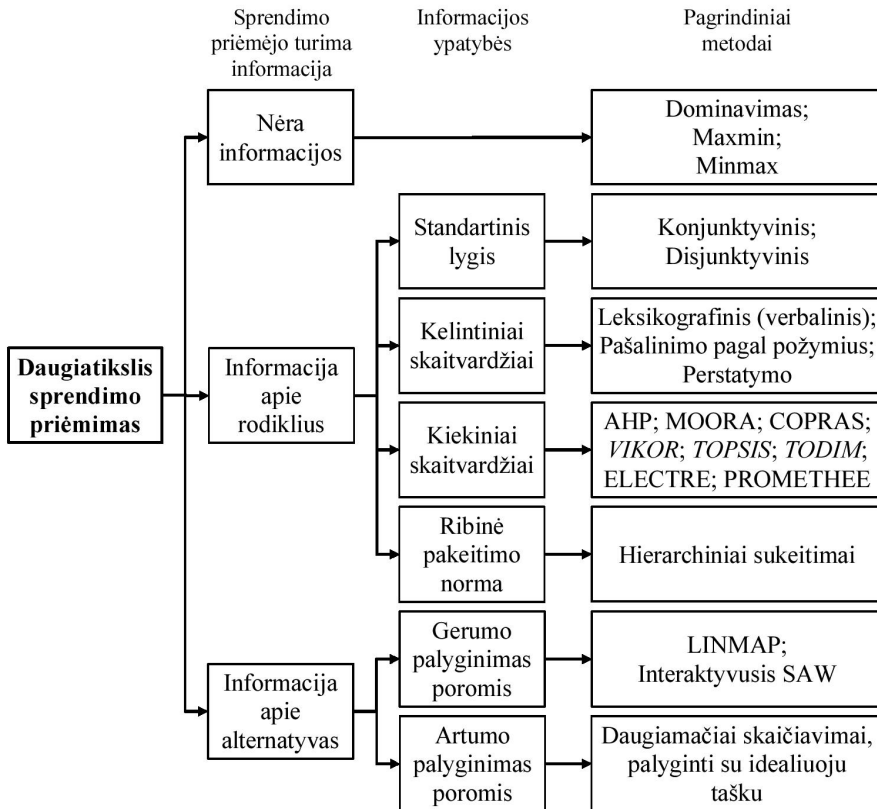
Pirmosios grupės metodų matematinė išraiška yra sudėtinga, jie sunkiai pritaikomi praktikoje (Simanavičienė 2011). Todėl šioje disertacijoje analizuojami ir taikomi tik daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai.

Tyrėjai, atlikdami daugiakriterių įvertinimą (angl. *Multi-Criteria Evaluation*) ar daugiakriterę analizę (angl. *Multi-Criteria Analysis*), dažniausiai naudoja daugiakriterius metodus. Taigi žodžiai *daugiakriteris* ir *daugiakriteris* yra tapę sinonimais ir siejami su antrosios grupės daugiakriteriais sprendimų priėmimo metodais (Šaparauškas 2004). Beto, rodiklių vertėmis yra aprašomi uždavinio tikslus išreiškiantys rodikliai. Todėl VGTU ir Lietuvos MADM mokykloje daugiakriteriniai sprendimo priėmimo metodai dažnai vadinami daugiakriteriais.

Belton ir Stewart (2002) bei Zavadskas (Zavadskas *et al.* 1998, 2006, 2010b) ir kiti mokslininkai teigia, kad daugiakriteriais metodais nepasiekiamas galutinis sprendimas. Galutinį sprendimą priima žmogus ar grupė žmonių (ekspertų). Daugiakriteriniai metodai padeda susisteminti ir apdoroti matematiškai pateiktą informaciją – sudaryti alternatyvų prioritetų eilutę (alternatyvas ranguoti), parodančią vienos alternatyvos pranašumą už kitą. Ekspertas priimančias sprendimus, analizuoja galimas alternatyvas, remdamasis apibūdinančiais rodikliais, kurie gali tarpusavyje skirtis tiek savo struktūra, tiek patikimumo lygiu.

Turskis (2009) pateikė daugiakriterių vertinimo metodų klasifikavimą (pagrįstą Hwang, Yoon (1981) principais) pagal priėmėjo turimą informaciją ir informacijos ypatybes (1.13 pav.).

Guitouni ir Mertel pasirenkant metodą pasiūlė kreipti dėmesį tik į svarbiausius daugiatislio sprendimo priėmimo metodo procesus: skaičiavimo sudėtingumą, duomenų įvestį ir išvestį (Ishizaka, Nemery 2013).



1.13 pav. Daugiarodiklių vertinimo metodų klasifikavimas

(Turskis *et al.* 2009)

Fig. 1.13. Classification of multi-attribute decision analysis methods

(Turskis *et al.* 2009)

1.12 lentelėje pateikti tik keli pavyzdžiai, kuriuos tyrė mokslininkai statybos inžinerijos kryptyje. Kiekvienas metais daugiatisliais sprendimo priėmimo metodais sprendžiamų optimizacijos uždavinių kiekis didėja (Zavadskas, Turskis 2011).

Remiantis daugelio mokslininkų (Hawang Yoon 1981, Ustinovičius, Zavadskas 2004; Zavadskas, Turskis 2011) aprašytomis daugiakriterių sprendimo priėmimo metodų klasifikacijomis, R. Simavičienė (2011) pateikia daugiakriterių metodų klasifikacijos sistemą (1.13 lentelė).

**1.12 lentelė.** Daugiakriterių sprendimo priėmimo metodų pritaikymas statybos inžinerijoje

**Table 1.12** Adjusting multi-attribute decision making methods for civil engineering

Daugiakriterių metodas	Straipsnio autoriai (metai)	Sprendžiama problema
AHP; FUZZY AHP	Taylan <i>et al.</i> (2014)	Statybos projektų atrankos ir rizikos vertinimas
TOPSIS	Pinter, Pšunder (2013)	Statybos projektų sėkmingumo vertinimas
COPRAS	Kaklauskas <i>et al.</i> (2006)	Langų parinkimas atnaujinant pastatus
	Zavadskas <i>et al.</i> (2008)	Pastatų atnaujinimo scenarijų (pagal investicijų dydį) priskyrimas miesto mikrorajonams
SAW	Simanavičienė (2011)	Kiekybinių daugiakriterių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė

**1.13 lentelė.** Daugiakriterių metodų klasifikacija (Simavičienė 2011)

**Table 1.13.** A taxonomy of method for the multiple attribute decision making (Simavičienė 2011)

Metodų klasė	Informacija, gauta iš sprendimą priimančio asmens, apie rodiklius	Metodų pavadinimai
Metodai pagrįsti daugiakriterių naudingumo teorija	Kiekybiniai matavimai	SAW, TOPSIS, TOPSIS-G, COPRAS, COPRAS-G, ARAS, MOORA, VIKOR, MULTIMOORA
Analitinės hierarchijos ir neapibrėžtų aiškių metodai	Kokybiniais matavimams suteikiamas kiekybinis pavidalas	AHP, FUZZY
Verbalinės analizės sprendimų metodai	Kokybiniai matavimai, nepereinama prie kiekybinių kintamųjų	ZAPROS, PARK, ORKLASS, CLARA, DIFLASS, CIKL
Lyginamosios preferencijos metodai	Kiekybiniai ir kokybiniai matavimai	ELECTRE, PROMETHEE, MELCHIOR, UTA, MAUT, TACTIC

Saaty (Saaty, Ergu 2015) pristatė 16 kriterijų rinkinį pagal kurį galima įvertinti MCDM metodų tinkamumą:

- 1) skaičiavimų paprastumas;
- 2) struktūros detalumas: išsamumas ir gylis;
- 3) aiški prioritetų rangavimo sistema;
- 4) logiška, matematinė procedūra;
- 5) prioritetų nustatymas pagrįstas aksiomomis;
- 6) matavimo skalės aiškumas;
- 7) sprendimų sintezė su besijungiančiomis funkcijomis;
- 8) kiekybinių parametrų rangavimo sistema;
- 9) kokybinių parametrų apibendrinimo sistema;
- 10) reitingo išsaugojimas ir atstatymas;
- 11) jautrumo analizė;
- 12) sprendžiamų problemų validumas;
- 13) sprendimo rezultatų prognozavimas;
- 14) priklausomybių ir grįžtamojo ryšio apibendrinamumo aspektas;
- 15) pritaikymas sprendžiant konfliktines situacijas;
- 16) patikimumo ir galiojimo laiko nustatymo galimybė.

Taigi parenkant MCDM metodus, rekomenduojama atsižvelgti į Saaty pasiūlytą atrankos kriterijų rinkinį.

Daugiakriterės analizės srityje naudojami metodai nėra tobuli. Triantaphyllou palygino skirtingus daugiatakslės analizės metodus ir priėjo prie išvados, kad neįmanoma nustatyti geriausio metodo, konkrečioms problemoms spręsti, metodai gali būti tinkami arba ne (Triantaphyllou 2000). Mokslininkai prieina prie išvados, jog daugiataksliai metodai padeda susisteminti ir apdoroti turimą informaciją – sudaryti alternatyvių prioritetų eilutę, parodančią, kiek viena alternatyva pranašesnė už kitą (Simanavičienė 2011).

Šioje disertacijoje vartojamą sąvoką *daugiatakslė selektonovacija* autorius supranta kaip *win-win* principo taikymą, t. y. visų suinteresuotų grupių poreikius labiausiai tenkinančio sprendimo ieškojimą. Tam tikslui naudoti daugiakriteriai (daugiataksliai) sprendimo priėmimo metodai.

Atsižvelgiant į užsibrėžtų uždavinių kompleksiskumą bei pritaikius Saaty metodų tinkamumo atrankos rinkinį (Saaty, Ergu 2015), disertacijoje daliai uždavinių spręsti nutarta taikyti tokius daugiatakslius kiekybinius sprendimo priėmimo metodus:

- TOPSIS metodas (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) – artumo idealiajam taškui metodas (Hwang, Yoon 1981);
- SAW metodas (*Simple Additive Weighting*) – paprastasis adityvus svėrimo metodas (MacCrimmon 1968);
- COPRAS metodas (*COMplex PROportional ASsessment*) – kompleksinio proporcingumo vertinimo metodas (Zavadskas, Kaklauskas 1996).

O įvairiais metodais gautus rezultatus apibendrinami VIDURKIO ir COPELAND metodu.

## 1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Literatūros apžvalga pagrindžia energinio naudingumo ir gyvavimo ciklo analizės principais grįstų ekonominio naudingumo principų aktualumą, sprendžiant mažaenergių pastatų projektavimo uždavinius. Daug mokslininkų dėmesio skiriama energijos beveik nevartojančių pastatų (NZEB) problemoms spręsti. Išskiriamos trys moksliniu požiūriu probleminės sritys, konstruojant NZEB pastatus: finansiniai, energinis naudingumas ir aplinkosauga.
2. Pastato išorės atitvarų racionalus apšildymas daro didžiulę įtaką galutiniam energijos poreikiui ir taupymui. Iki 60 % bendrų išlaidų per pastato gyvavimo trukmę (LLC, angl. *life-cycle cost*) galima sutaupyti tik racionaliai apšildžius pastato išorės atitvaras.
3. Sprendžiant pastato planavimo ir projektavimo problemas, dažnai taikomi daugiataksliai sprendimo priėmimo metodai. Pagrindinis optimizavimo tikslas – rasti minimalią arba maksimalią tikslo funkcijos vertę, pasirinkus atitinkamą skaičių kintamųjų. Atlikus analizę, darbe atrinkti ir nagrinėjami energinio ir ekonominio efektyvumo kriterijai, darantys įtaką vienbučio gyvenamojo pastato išorės atitvarų (sienų, stogo ir grindų ant grunto) racionaliam termoizoliaciniam sluoksniui vertinti.
4. Racionalių sąnaudų atžvilgiu skaičiavimo metodika moksliniuose darbuose grindžiama gryniosios dabartinės vertės (GDV) bendrųjų išlaidų metodika. Jei GDV yra neigiama, tai į tokį projektą investuoti ekonomiškai nenaudinga. Jei GDV yra teigiama ( $GDV > 0$ ), tai į tokį projektą investuoti yra efektyvu. Kai  $GDV = 0$  (esant lūžio taškui), galima skaičiuoti projekto pradinių investicijų atsipirkimo laiką.
5. Daugiatakslio sprendimo priėmimo metodai turi privalumų ir trūkumų bei priklauso nuo nagrinėjamos problemos pobūdžio, turimos informacijos, rezultatų gavimo tipo. Daugiataksliai metodai nėra sprendėjai, galutinį sprendimą priima žmogus ar keletas žmonių (ekspertų). Skirtingi metodai padeda susisteminti ir apdoroti turimą informaciją matematiškai – sudaryti alternatyvių prioritetų eilutę, rodančią, kiek viena alternatyva pranašesnė už kitą. Sudėtingus uždavinius tikslinga

spręsti skirtingais daugiatiskslio vertinimo metodais, visapusiškai analizuojančiais konkrečią sprendžiamą problemą.

6. Kadangi nagrinėjamos mokslinės problemos yra kompleksiško pobūdžio, todėl sprendžiant uždavinius, siūloma taikyti daugiatiskslius sprendimų priėmimo metodus.

Atsižvelgiant į apibendrinimus, suformuluoti pagrindiniai šio darbo uždaviniai:

1. Sudaryti integruotą daugiatiskslio vertinimo modelį ir jo taikymo algoritmą, pagrįstą energinio ir ekonominio naudingumo principais.
2. Ištirti daugiatiskslių sprendimo metodų taikymo galimybes ir parinkti jų derinį sprendžiamoms problemoms vertinti.
3. Praktiškai pritaikyti daugiatiskslės selektonovacijos algoritmą vertinant vienbučio gyvenamojo pastato racionalius termoizoliacinio sluoksnio atrankos uždavinius.



# 2

---

## **Daugiatikslės selektonovacijos modelis pastato atitvarų racionaliam termoizoliaciniam sluoksniui parinkti**

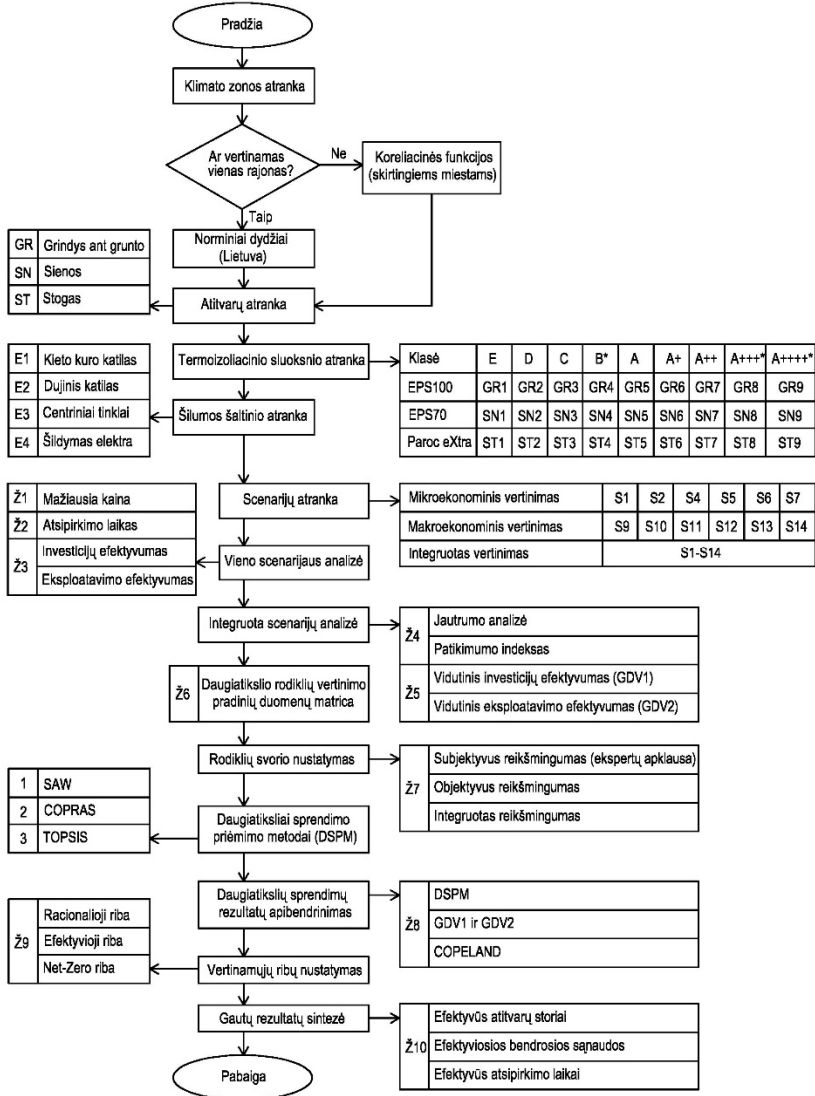
Daugiatikslis sprendimo priėmimas – tai vienas iš sprendimo priėmimo būdų, kuris naudojamas norint surasti racionalų sprendinį (alternatyvą). Daugiatikslių sprendimo priėmimo metodų tikslas yra sukurti geriausią galimą sprendinį, kuris tenkintų sprendimo priėmėjo iškeltus tikslus ir apribojimus.

Bendruoju atveju sprendimo priėmimo procesą sudaro keturi pagrindiniai etapai (Volvačiovas 2014):

1. Problemų identifikavimas (rodiklių atrinkimas).
2. Rodiklių svorių (reikšmingumą) nustatymas.
3. Alternatyvų (variantų) aprašymas (atrinkimas).
4. Geriausios alternatyvos nustatymas.

Kiekvienas sprendimas bus priimtas tinkamai, jeigu jis efektyvus, įvertinus visus pagrindinius tikslus charakterizuojančius veiksniais (rodiklius). Todėl būtina kompleksiskai įvertinti galimus sprendimo variantus (Zavadskas, Vaigauskas 1985). Šio skyriaus apibendrinta medžiaga paskelbta Avižos (2014), Avižos ir Bernoto (2015e), Avižos ir Fiodorovo *et al.* (2015f), Avižos ir Tamoševičiaus *et al.* (2015g) publikacijose.

Norint nustatyti pastato atitvarų (sienų, stogo bei grindų ant grunto) racionalių termoizoliacinio sluoksnio storio geriausias alternatyvas, autorius sukūrė teorinį daugiatickslės selektonovacijos modelio algoritmą (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Daugiatickslės selektonovacijos modelio algoritmas (sudarytas autoriaus)  
 Fig. 2.1. Algorithm of integration decision-making model (author created)

Daugiatikslio sprendimo priėmimo procesą sudaro 13 pagrindinių etapų:

1 etapas. Klimato zonos atranka: skaičiavimai atliekami vienam rajonui (norminiai dydžiai) arba skirtingiems rajonams/mietams (tokiu atveju autorius siūlo naudoti empirinio tyrimo metu sukurtas koreliacinių priklausomybių funkcijas žr. 2.1 poskyrį).

2 etapas. Atitvarų atranka. Šiame darbe bus vertinamos trys atitvarų rūšys: grindys ant grunto (GR), sienos (SN) bei stogas (ST).

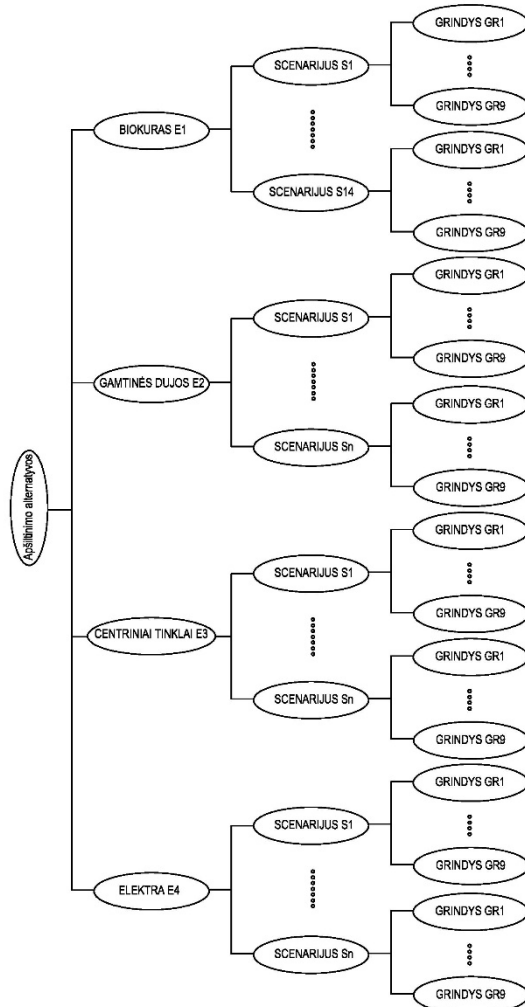
3 etapas. Termoizoliacinio sluoksnio atranka. Šiame etape vertinamos trys tradicinės termoizoliacinės medžiagos: grindims ant grunto – polistireninis putplastis *EPS100*, sienoms – polistireninis putplastis *EPS70* ir stogui – akmens vata *Paroc eXtra*. Galimų alternatyvų variantai yra suskirstyti pagal energinio naudingumo klases keliamus norminius reikalavimus. Tirtos 9 energinio naudingumo klasės: E, D, C, B\*, A, A+, A++, A+++, A++++\* (2.1 lentelė). Kur B\* klasės duomenys priimti kaip C ir A klasės aritmetinis vidurkis, o A++++\* ir A++++\* – eksperimentinės klasės, skirtos norint pamatyti kaip išsibarsto duomenys esant dideliems termoizoliacinio sluoksnio storiams. Siekiant nustatyti reikalingą termoizoliacinio sluoksnio storį, skirtingoms energinio naudingumo klasėms, yra skaičiuojami atitvarų šilumos perdavimo koeficientai, šiluminiai nuostoliai ir sutaupymai (žr. 2.2 poskyrį).

### 2.1 lentelė. Atitvarų alternatyvų klasifikacijos sistema

**Table 2.1.** Classification system of building envelopes alternatives

Alternatyvos kodas	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Energinio naudingumo klasė	E	D	C	B*	A	A+	A++	A+++*	A++++*
Grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) kodas	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9
Grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storis, mm	20	50	90	120	200	250	310	400	500
Sienų termoizoliacinio sluoksnio (EPS70) kodas	SN1	SN2	SN3	SN4	SN5	SN5	SN6	SN8	SN9
Sienų termoizoliacinio sluoksnio (EPS70) storis, mm	20	50	130	180	270	300	340	400	500
Stogo termoizoliacinio sluoksnio (Paroc eXtra) kodas	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9
Stogo termoizoliacinio sluoksnio (Paroc eXtra) storis, mm	150	200	310	390	510	570	640	700	800

4 etapas. Šilumos šaltinio atranka. Šiame etape vertinami keturių rūšių šilumos šaltiniai (žr. 2.2 pav.): kietojo kuro katilas, naudojantis biokuro energiją (E1); dujinis katilas, naudojantis gamtinių dujų energiją (E2); centriniai tinklai, naudojantys mišrų energijos tipą (E3), bei elektrinis katilas, naudojantis elektros energiją (E4). Energijos, mokesčių ir šilumos šaltinio tyrimų atrankos duomenys pateikti 2.2 lentelėje.



2.2 pav. Sprendimo medžio fragmentas, naudojamas alternatyvų atrankai (sudarytas autoriaus)

Fig. 2.2. A fragment of decision tree used for selection of alternatives (author created)

**2.2 lentelė.** Energijos, mokesčių ir šilumos šaltinio tyrimų atrankos duomenys  
**Table 2.2.** Research data of energy, taxes and heat source selection

Eil. Nr.	Energijos šaltinio kodas/Rodikliai	E1	E2	E3	E4	Pastabos
1	Energijos šaltinis+reguliavimo tipas	Kieto kuro katilas + automatinis reguliavimas	Dujinis katilas +automatinis reguliavimas	Centrinis šildymas+automatinis reguliavimas	Šildymas elektra + automatinis reguliavimas	Projekctas
2	Neatsinaujinančios pirminės energijos faktorius (vnt)	0.10	1.10	0.91	2.8	STR 2.01.09:2012
3	Atsinaujinančios pirminės energijos faktorius (vnt)	1.00	0.00	0.40	0.00	STR 2.01.09:2012
4	CO <sub>2</sub> emisijų faktorius (kgCO <sub>2</sub> /kWh)	0.00	0.20	0.17	0.60	STR 2.01.09:2012
5	Šildymo sistemos regaliavimo įtaisų naudingumo koeficientas (vnt.)	0.98	0.98	0.98	0.98	STR 2.01.09:2012
6	Šilumos šaltinio naudingumo koeficientas (vnt.)	0.85	0.94	1.00	1.00	STR 2.01.09:2012
7	Valstybės subsidija už energiją taupančias priemones (naujiems pastatams), proc.	0	0	0	0	AM
8	PVM mokestis energijai, proc.	21	21	9	21	VMI
9	PVM mokestis statybinėms medžiagoms, proc.	21	21	21	21	VMI
10	Mokestis už toną CO <sub>2</sub> ekvivalento iki 2020 m, €/t	20	20	20	20	ES Nr. 244/2012
11	Mokestis už toną CO <sub>2</sub> ekvivalento iki 2030 m, €/t	35	35	35	35	ES Nr. 244/2012
12	Mokestis už toną CO <sub>2</sub> ekvivalento po 2030 m, €/t	50	50	50	50	ES Nr. 244/2012
13	Energijos kaina su PVM, €/kWh	0,019	0,032	0,061	0,126	VKEKK

5 etapas. Scenarijų atranka. Scenarijai parenkami pagal du kriterijus: tikrąją diskonto normą ir kasmetinį prognozuojamą energijos brangimą (pagal ES reglamento Nr. 244/2012 reikalavimus). Tam tikslui autorius sukūrė scenarijų sistemą (žr. 2.3 lentelę) ir pasiūlė daugiatiakslės selektonovacijos metu naudoti integruotą mikro- ir makroekonominį vertinimą.

Mikroekonominiam vertinimui atrinkti S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 scenarijai, makroekonominiam vertinimui S8, S9, S10, S11, S12, S13, S14 scenarijai. Taip pat šiame darbe autorius pasiūlo atlikti integruotą ekonominį vertinimą, apimantį bendruosius vartotojų poreikius. Vertinimo perspektyvos ir apribojimai pateikti 2.4 lentelėje.

**2.3 lentelė.** Prognozuojami scenarijai pagal ES reglamentą Nr. 244/2012  
**Table 2.3.** The forecast scenarios by EU regulations No. 244/2012

Vertinimas	Vartotojų poreikiai	Energijos brangimo scenarijus	Scenarijaus numeris	Metinis energijos pabrangimas, proc.	Tikroji diskonto norma, proc.
Mikroekonominis	Individualūs, komerciniai, dažnai trumpalaikio investavimo poreikiai	Optimistinis	S1	1,0	5,0
			S4		6,0
		Realistinis	S2	2,8	5,0
			S5		6,0
		Pesimistinis	S3	5,0	5,0
			S6		6,0
		Didelių kainų	S7	7,0	6,0
Makroekonominis	Visuomeniniai, ilgalaikės perspektyvos nekilnojamojo turto savininkų investavimo poreikiai	Optimistinis	S8	1,0	3,0
			S11		4,0
		Realistinis	S9	2,8	3,0
			S12		4,0
		Pesimistinis	S10	5,0	3,0
			S13		4,0
		Didelių kainų	S14	7,0	3,0
Integruotas (vertinant patikimumo indeksą)	Bendrieji poreikiai	Visi scenarijai	S1-S14	vidurkis	vidurkis

**2.4 lentelė.** Vertinimo perspektyvos ir apribojimai**Table 2.4.** Perspectives of assessment and limitations

Vertinimo perspektyvos	Mokesčiai	Subsidijos	Mokestis už CO <sub>2</sub> emisiją	Tikroji diskonto norma
Mikroekonominė (privataus užsakovo pozicija)	Viskas įskaičiuota	Viskas įskaičiuota	Neskaiciuojamas	5–6 proc.
Makroekonominė (valstybinio užsakovo užsakovas)	Be mokesčių	Be subsidijų	Skaičiuojamas	3–4 proc.
Integruotas (privatūs ir valstybiniai užsakovai)	Mokesčių vidurkis	Subsidijų vidurkis	Mokesčių vidurkis	Diskonto normų vidurkis

6 etapas. Vieno scenarijaus analizė. Šiame etape (energinio naudingumo klasių spektro ribose) apskaičiuojama: sąnaudų atžvilgiu mažiausios išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį laikotarpį; pradinių investicijų atsipirkimo laikas (GDV lūžio taškas); investicijų ir eksploatavimo efektyvumas (žr. 2.3 poskyrį).

7 etapas. Integruota scenarijų analizė. Šiame etape (energinio naudingumo klasių spektro ribose) atliekama: scenarijų jautrumo analizė; patikimumo indeko nustatymas; apskaičiuojamas vidutinis investicijų ir eksploatavimo efektyvumas.

8 etapas. Alternatyvų prioritetų eilutės nustatymui sudaroma daugiatislio vertinimo pradinių duomenų matrica. Šiame etape vertinami 5 rodikliai (2.5 lentelė): termoizoliacinio sluoksnio storis, šilumos perdavimo koeficientas, vidutinė sąnaudų suma per 30 metų laikotarpį ir patikimumo ideksas.

**2.5 lentelė.** Rodiklių parinkimas alternatyvų analizei**Table 2.5.** Criteria set for analysis of alternatives

Eil. Nr.	Rodiklis	Matavimo vienetai
$R_1$	Termoizoliacinio sluoksnio storis	mm
$R_2$	Šilumos perdavimo koeficientas	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$R_3$	Vidutinė sąnaudų suma per 30 metų laikotarpį	€/m <sup>2</sup>
$R_4$	Vidutinis pradinių investicijų atsipirkimo laikas	metai
$R_5$	Patikimumo indeksas	vnt. d.

9 etapas. Rodiklių reikšmingumų nustatymas: subjektyvus reikšmingumas (atliekant ekspertų apklausą porinio lyginimo metodu), objektyvus reikšmingumas (entropijos metodu) ir integruotas reikšmingumas (žr. 2.4 poskyrį).

10 etapas. Daugiatikslių sprendimo metodų (SAW, COPRAS, TOPSIS) komplekso analizė ir alternatyvų rangavimas (žr. 2.5, 2.6, 2.7 poskyri).

11 etapas. Skirtingais metodais gautų rezultatų palyginimas VIDURKIO ir COPELAND metodu (žr. 2.8 poskyri).

12 etapas. Vertinamųjų ribų nustatymas: 1) *racionali riba* (COPELAND) – daugiaticslės selektonovacijos integruoto vertinimo metodu atrinkta vertė (įvertintos sąnaudų atžvilgiu mažiausios projekto išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį periodą); 2) *efektyvi riba* (GDV2) – maksimali eksploataavimo efektyvumo vertė (įvertinus išlaidas ir sutaupymus), kai projekto  $GDV > 0$ . 3) *net-zero riba* (STR 2.01.09:2012) – nuo 2021 m. energijos beveik nenaudojančio pastato A++ energinio naudingumo klasės norminius reikalavimus tenkinanti vertė.

13 etapas. Rezultatų sintezė. Šiame etape atliekamas rezultatų palyginimas: 1) efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio storių; 2) efektyvios bendrosios sąnaudos per 30 metų skaičiuojamąjį laikotarpį; 3) efektyvūs atsipirkimo laikai.

## 2.1. Klimato įtakos termoizoliaciniams sluoksniams empirinis tyrimas Lietuvos sąlygomis

Problema ta, kad pagal šiuo metu Lietuvoje galiojančius norminius energinio naudingumo vertinimo dokumentus (STR 2.05.01:2013) Lietuva yra vertinama kaip vienas klimatinis rajonas, kurio vidutinė šildymo sezono išorės oro temperatūra  $+0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pagal RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“ duomenis, skirtingose Lietuvos klimato zonose yra skirtinga išorės oro temperatūra (žr. 2.6 lentelę), todėl naudojant koreliacinių priklausomybių funkcijas, šiame darbe bus detalčiau iširtas šis faktas bei nustatytas tikslesnis atitvarų termoizoliacinio sluoksnio storio apskaičiavimo sprendimas.

Siekiant išsiaiškinti klimato bei geografinės vietovės įtaką termoizoliacinio sluoksnio storiui, buvo atlikti empiriniai tyrimai (Aviža *et al.* 2014, 2015) septyniems charakteringiems Lietuvos miestams (Vilniui, Kaunui, Klaipėdai, Šiauriam, Panevėžiui, Utenai ir Daukšui). Vidutinės išorės oro temperatūros priimtos pagal 2.6 lentelės duomenis.

Tyrimų skaičiavimai atlikti naudojant tą patį modelį/detalę (tuos pačius pastato projektinius sprendinius), keičiant tik objekto statybos geografinę vietovę ir klimatinis duomenis.

Tyrimo metu termoizoliacijai buvo naudojamos tradicinės šiltinimo medžiagos: stogui – akmens vata (*Paroc Extra*); sienoms – polistireninio putplasčio plokštės (*EPS70*); grindims ant grunto – polistireninio putplasčio plokštės (*EPS100*). Pagal atitvarų šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimo metodologiją bei energinio naudingumo norminius atitvarinių konstrukcijų reikalavimus, priartėjimo būdu buvo apskaičiuotas reikalingas šilumos izoliacinio sluoksnio storis.



Nustatant geografinės vietovės koreliacinės priklausomybės ryšį tarp pastato energinio naudingumo klasės ir ištisinio termoizoliacinio sluoksnio storio, buvo vertinti kokybiniai parametrai (2.7 lentelė).

**2.6 lentelė.** Vidutinė šildymo sezono išorės oro temperatūra ir trukmė (RSN 156-94)

**Table 2.6.** The average outside air temperature during a heating season and duration of a heating season in days (RSN 156-94)

Vietovė	Šildymo sezono pradžia/pabaiga <10 °C	
	Vidutinė temperatūra, $\theta_e$ , °C	Trukmė, paromis
Šiauliai	0,6	222
Panevėžys	0,4	218
Klaipėda	1,9	214
Utena	0,1	221
Dūkštas	-0,3	223
Kaunas	0,7	219
Vilnius	0,2	225
Lietuva	0,6	220

**2.7 lentelė.** Kokybiniai parametrai

**Table 2.7.** The qualitative parameters

Eil. Nr.	Energinio naudingumo klasė	Kokybinis parametras, $x$ , balais
1	B	1
2	A	2
3	A+	3
4	A++	4

Skaičiavimams pagrįsti buvo naudojama polinominė trečio laipsnio regresijos funkcija. Koreliacijos koeficientas visose lygtyse gavosi lygus vienetui ( $R = 1$ ). Tai parodo, kad egzistuoja aukštos kokybės ryšys tarp energinio naudingumo klasės ir termoizoliacinio sluoksnio storio.

Atlikus skaičiavimus, nustatyta, kad Lietuvą vertinti kaip vieną klimatinį rajoną nėra tikslo. Dabar galiojanti energinio naudingumo skaičiavimo tvarka labiausiai tinka tik Kauno bei Šiaulių regionams (2.9 lentelė) vertinti, kadangi šiuose rajonuose sutampa norminių reikalavimų dydžiai. Todėl vien tik Lietuvoje siūloma vertinti minimaliai 3–5 klimatinės zonas.

**2.8 lentelė.** Reikalingas termoizoliacinio sluoksnio storis ( $y$ ), mm (sudaryta autoriaus)  
**Table 2.8.** Needed thermo-insulation layer thickness ( $y$ ), mm (author created)

Atitvara	Miestas	Koreliacinė funkcija ( $y$ ), mm (reikalingas termoizoliacinio sluoksnio storis)
Stogas	Dūkštas	$y = 25 \cdot x^3 - 220 \cdot x^2 + 685 \cdot x - 170$
	Vilnius ir Utena	$y = 30 \cdot x^3 - 255 \cdot x^2 + 755 \cdot x - 220$
	Panevėžys	$y = 23,333 \cdot x^3 - 205 \cdot x^2 + 641,67 \cdot x - 150$
	Šiauliai ir Kaunas	$y = 23,333 \cdot x^3 - 205 \cdot x^2 + 641,67 \cdot x - 160$
	Klaipėda	$y = 25 \cdot x^3 - 215 \cdot x^2 + 650 \cdot x - 180$
	Norminis (Lietuva)	$y = 28,333 \cdot x^3 - 245 \cdot x^2 + 736,67 \cdot x - 220$
Sienos	Dūkštas	$y = 18,333 \cdot x^3 - 165 \cdot x^2 + 506,67 \cdot x - 220$
	Utena	$y = 20 \cdot x^3 - 175 \cdot x^2 + 525 \cdot x - 240$
	Vilnius	$y = 18,333 \cdot x^3 - 165 \cdot x^2 + 506,67 \cdot x - 230$
	Šiauliai ir Panevėžys	$y = 18,333 \cdot x^3 - 160 \cdot x^2 + 481,67 \cdot x - 210$
	Kaunas	$y = 16,667 \cdot x^3 - 150 \cdot x^2 + 463,33 \cdot x - 200$
	Klaipėda	$y = 16,667 \cdot x^3 - 150 \cdot x^2 + 463,33 \cdot x - 220$
Norminis (Lietuva)	$y = 28,333 \cdot x^3 - 245 \cdot x^2 + 736,67 \cdot x - 220$	
Grindys ant grunto	Dūkštas	$y = 15 \cdot x^3 - 125 \cdot x^2 + 390 \cdot x - 190$
	Vilnius ir Utena	$y = 15 \cdot x^3 - 125 \cdot x^2 + 390 \cdot x - 200$
	Panevėžys	$y = 13,33 \cdot x^3 - 115 \cdot x^2 + 371,67 \cdot x - 190$
	Šiauliai ir Kaunas	$y = 13,33 \cdot x^3 - 110 \cdot x^2 + 346,67 \cdot x - 170$
	Klaipėda	$y = 15 \cdot x^3 - 125 \cdot x^2 + 380 \cdot x - 200$
	Norminis (Lietuva)	$y = 13,33 \cdot x^3 - 110 \cdot x^2 + 346,67 \cdot x - 170$
čia $x$ – energinio naudingumo klasė, balais (2.7 lentelė)		

Tam, kad projektuotojai, energijos vartojimo auditoriai bei ekspertai galėtų preliminariai įvertinti reikalingą medžiagų kiekį, rekomenduojama vienbučių gyvenamųjų pastatų išorės atitvarų šilumos izoliacinio sluoksnio storį skaičiuoti pagal koreliacinių priklausomybių funkcijas, pateiktas 2.8 lentelėje.

Vertinant tos pačios energinio naudingumo klasės pastatus tik skirtingose Lietuvos klimatinėse zonose, nustatyta, kad ploniausias termoizoliacinio sluoksnio storis reikalingas Klaipėdos regione, storiausias – Dūkšte. Didžiausia klimato kaitos įtaka yra B energinio naudingumo klasių pastatams (žr. 2.9 lentelę).

Atlikta vienbučio gyvenamojo pastato termoizoliacinio sluoksnio koreliacinė analizė parodė, kad šilumos izoliacijos sluoksnio storis kinta priklausomai nuo energinio naudingumo klasės bei objekto statybos geografinės vietovės tipo. Iki projektinėje stadijoje parenkant reikalingą preliminarų šiltinimo medžiagų kiekį, skirtingiems Lietuvos regionams, rekomenduojama naudoti skirtingas koreliacinių priklausomybių funkcijas. Tai ypač aktualu skaičiuojant sąmatas bei atliekant investicijų ekonominius skaičiavimus.

**2.9 lentelė.** Apskaičiuotas termoizoliacinio sluoksnio storis

**Table 2.9.** The thickness of the calculated thermo-insulation layer

Energinio naudingumo klasė	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								Medžiagų kiekio skirtumas, %
	Lietuva (norminis)	Dūkštai	Utena	Vilnius	Panevėžys	Šiauliai	Kaunas	Klaipėda	
STOGAS (Paroc Extra)									
B	300	320	310	310	310	300	300	280	13
A	500	520	510	510	500	500	490	460	12
A+	550	580	570	560	560	550	550	510	12
A++	620	650	640	640	630	620	620	580	11
SIENOS (EPS70)									
B	130	140	130	130	130	130	130	110	21
A	260	280	270	270	260	260	260	240	14
A+	290	310	300	300	290	290	290	270	13
A++	330	340	340	330	330	330	320	300	12
GRINDYS ANT GRUNTO (EPS100)									
B	80	90	80	80	80	80	80	70	22
A	190	210	200	200	200	190	190	180	14
A+	240	260	250	250	250	240	240	220	15
A++	310	330	320	320	310	310	310	280	15

## 2.2. Pastato išorės atitvarų šilumos perdavimo koeficientų, šiluminių nuostolių ir sutaupymų skaičiavimo metodologija

Šlaitinio stogo, išorinių sienų ir grindų ant grunto projektuojamas šilumos perdavimo koeficientas, šiluminiai nuostoliai ir energijos sutaupymai skaičiuoti pagal STR 2.01.09:2012 metodologiją.

Šlaitinio *stogo* su vėdinamu oro sluoksniu (žr. 2.3 pav.) visuminė šiluminė varža  $R_t$  ( $m^2 \cdot K/W$ ) ir šilumos perdavimo koeficientas  $U$  ( $W/(m^2 \cdot K)$ ) apskaičiuotas pagal formules:

$$R_t = R_{si} + R_{s1} + R_{si}; \quad (2.1)$$

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{si} + R_{s1} + R_{si}}. \quad (2.2)$$

čia  $R_{si}$  – stogo vidinio paviršiaus šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $R_{s1}$  – stogo sluoksnių suminė šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ).

Stogo suminė šiluminė varža  $R_{s1}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) apskaičiuota pagal formulę:

$$R_{s1} = R_1 + R_2 + \dots + R_n + (R_g + R_q); \quad (2.3)$$

čia  $R_g$  – nevedinamo oro sluoksnio šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ). Šiame darbe nevertinta, nes stogas vėdinamas;  $R_q$  – plono sluoksnio (plėvelės) šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );

$R_1, R_2, \dots, R_n$  – atskirų stogo sluoksnių šiluminės varžos ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ). Apskaičiuojamos pagal formulę:

$$R = \frac{d}{\lambda_{ds}}; \quad (2.4)$$

čia  $d$  – sluoksnio storis (m);  $\lambda_{ds}$  – sluoksnyje panaudoto statybos produkto projektinis šilumos laidumo koeficientas ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ).

Pagrindinė tikrinimo sąlyga – stogo atitvaros šilumos perdavimo koeficientas turi tenkinti norminius reikalavimus:

$$U_{r,x} \leq U_{N,r}; \quad (2.5)$$

čia  $U_{r,x}$  – stogo atitvaros projektinis šilumos perdavimo koeficientas  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , kuris tiesiogiai priklauso nuo tiriamojo objekto, t. y. termoizoliacinio sluoksnio storio;

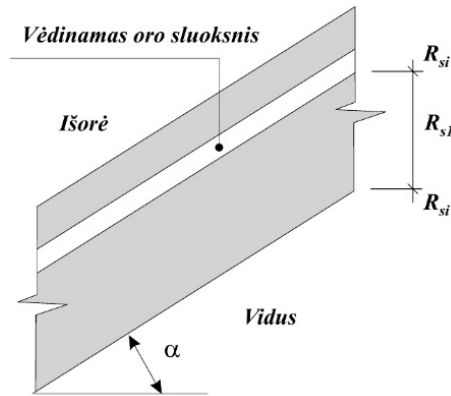
$U_{N,r}$  – norminis stogo atitvaros šilumos perdavimo koeficientas,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , priklausantis nuo pastato paskirties, energinio naudingumo klasės (1.11 lentelė) ir vidutinės šildymo sezono išorės oro temperatūros (2.6 lentelė).

Išorės sienos (2.4 pav.) visuminė šiluminė varža  $R_t$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) ir šilumos perdavimo koeficientas  $U$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) apskaičiuotas pagal formules:

$$R_t = R_{si} + R_{s1} + R_{se}; \quad (2.7)$$

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{si} + R_{s1} + R_{se}}; \quad (2.8)$$

čia  $R_{si}$  – sienos vidinio paviršiaus šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $R_{se}$  – sienos išorinio paviršiaus šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $R_{s1}$  – sienos sluoksnių suminė šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ).



**2.3 pav.** Ventiliuojamo šlaitinio stogo schema (STR 2.05.02:2008)

**Fig. 2.3.** A diagram of a roof partition with a ventilated air layer

Sienos suminė šiluminė varža  $R_{sl}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) apskaičiuota pagal formulę:

$$R_{sl} = R_1 + R_2 + \dots + R_n + (R_q); \quad (2.9)$$

čia  $R_q$  – plono sluoksnio (klijų) šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $R_1, R_2, \dots, R_n$  – atskirų stogo sluoksnių šiluminės varžos ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ). Apskaičiuojamos pagal formulę:

$$R = \frac{d}{\lambda_{ds}}; \quad (2.10)$$

čia  $d$  – sluoksnio storis (m);  $\lambda_{ds}$  – sluoksnyje panaudoto statybos produkto projektinis šilumos laidumo koeficientas ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ).

Pagrindinė tikrinimo sąlyga – sienos šilumos perdavimo koeficientas turi tenkinti norminius reikalavimus:

$$U_w \leq U_{N,w}; \quad (2.11)$$

čia  $U_w$  – sienos projektinis šilumos perdavimo koeficientas  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , kuris tiesiogiai priklauso nuo tiriamojo objekto, t. y. termoizoliacinio sluoksnio storio;

$U_{N,w}$  – norminis sienos šilumos perdavimo koeficientas,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , priklausantis nuo pastato paskirties, energinio naudingumo klasės (1.11 lentelė) ir vidutinės šildymo sezono išorės oro temperatūros (2.6 lentelė).

Kiekvieno mėnesio „ $m$ “ skaičiuojamieji  $Q_{H,w,m}$  ( $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mėn})$ ) šilumos nuostoliai per pastato sienas, pagal kuriuos skaičiuojami energijos poreikiai pastatui šildyti, apskaičiuojami pagal formulę:

$$Q_{H.w,m} = \frac{0,001 \cdot t_m \cdot 24}{A_p} \cdot (\theta_{iH} - \theta_{e,m}) \cdot \sum_{x=1}^n (A_{w,x} \cdot U_{w,x} \cdot k_{w,x}); \quad (2.12)$$

čia  $A_{w,x}$  – atitinkamos  $x$  sienos plotas ( $m^2$ );  $k_{w,x}$  – pataisos koeficientas atitinkamai  $x$  sienai (tarp patalpų ir išorės  $k_{w,x} = 1$ );

Bendrieji duomenys ir bendrosios formulės atitvarų, turinčių sąlytį su gruntu, skaičiavimams pateikti LST EN ISO 13370:2008 „Šiluminės pastatų charakteristikos. Šilumos pernaša gruntu. Skaičiavimo metodai (ISO 13370:2007)“ dokumente. Šiame darbe bus vertinamas grindų ant grunto su vertikaliu apšiltinimu sprendinys (žr. 2.4 pav.).

Grindų ant grunto projektinis šilumos perdavimo koeficientas  $U_{fg2,x}$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ , apskaičiuojamas pagal formulę:

$$U_{fg2,x} = U_{02,x} + \frac{2 \cdot \Psi_{g.e.2,x}}{B_{2,x}'}; \quad (2.13)$$

čia  $U_{02,x}$  – atitinkamų „ $x$ “ grindų ant grunto šilumos perdavimo pagrindinė dedamoji, priklausanti nuo grindų, ploto, jų formos ir grindis ribojančių sienų storio,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\Psi_{g.e.2,x}$  – pataisa, įvertinanti pakraščių vertikalojo apšiltinimo įtaką.

$B_{2,x}'$  – būdingasis grindų matmuo, apskaičiuojamas taip:

$$B_{2,x}' = \frac{A}{0,5 \cdot P}; \quad (2.14)$$

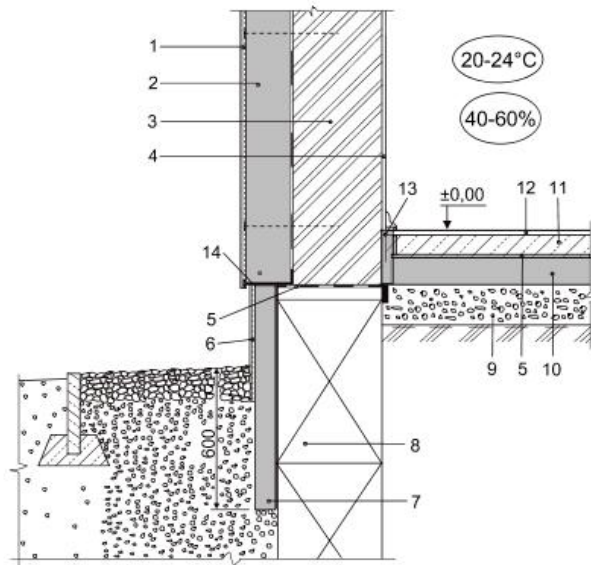
čia  $A$  – bendras grindų ant grunto plotas,  $m^2$ ;  $P$  – grindų perimetras,  $m$ .

Dydžių  $A$  ir  $P$  vertėms apskaičiuoti imami pastato vidaus matmenys.

Pagrindinė tikrinimo sąlyga – grindų ant grunto šilumos perdavimo koeficientas turi tenkinti norminius reikalavimus:

$$U_{fg2,x} \leq U_{N,fg}; \quad (2.15)$$

čia  $U_{fg2,x}$  – grindų ant grunto projektinis šilumos perdavimo koeficientas  $W/(m^2 \cdot K)$ , kuris tiesiogiai priklauso nuo tiriamojo objekto, t. y. ištisinio termozoliacinio sluoksnio storio;  $U_{N,fg}$  – norminis grindų ant grunto šilumos perdavimo koeficientas,  $W/(m^2 \cdot K)$ , priklausantis nuo pastato paskirties, energinio naudingumo klasės (1.11 lentelė) ir vidutinės šildymo sezono išorės oro temperatūros (2.6 lentelė).



**2.4 pav.** Atitvaros mazgas (ST 124555837.01:2005): 1) plonasluoksnė armuota sienos apdaila išorėje; 2) polistireninis putplastis; 3) laikantysis sienos sluoksnis; 4) sienos apdaila patalpoje; 5) krepuotas popierius; 6) cokolio apdaila; 7) polistireninis putplastis, priklijuotas vientisu sluoksniu prie pamatų; 8) juostinis pamatas; 9) sutankinta ir išlyginta skalda arba žvyras ant sutankinto grunto; 10) polistireninis putplastis; 11) armuotas betonas; 12) grindų danga; 13) polistireninio putplasčio tarpinė; 14) cokolinio profilis

**Fig. 2.4.** A diagram of a partition (ST 124555837.01:2005): 1 – thin rendering; 2 – thermal insulation; 3 – wall; 4 – surface finishing; 5 – horizontal waterproofing; 6 – plinth finishing; 7 – vertical thermal insulation; 8 – foundation; 9 – gravel layer; 10 – horizontal thermal insulation; 11 – concrete slab; 12 – floor covering

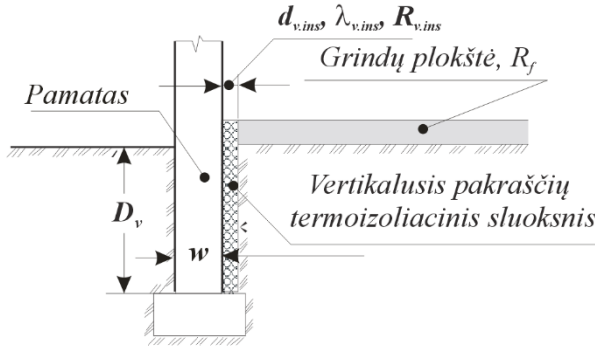
Kai grindys gerai apšiltintos ( $d_{t2,x} \geq B'_{2,x}$ ), tai  $U_{02,x}$  vertė apskaičiuota taip:

$$U_{02,x} = \frac{\lambda_{gr}}{0,457 \cdot B'_{2,x} + d_{t2,x}}; \quad (2.16)$$

čia  $\lambda_{gr}$  – grunto projektinis šilumos laidumo koeficientas,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_{gr} = 2 W/(m \cdot K)$ ;  $d_{t2,x}$  – atitinkamų „x“ grindų ant grunto, kai grindys apšiltintos pakraščiuose, atstojamasis grindų plokštės storis, išreikštas grunto sluoksnio storium, m:

$$d_{t2,x} = w_x + \lambda_{gr} \cdot (R_{se} + R_{f,i} + R_{si}); \quad (2.17)$$

čia  $R_{f,x}$  – atitinkamų „x“ grindų ant grunto, kai grindys apšiltintos pakraščiuose, grindų plokštės šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $w_x$  – atitinkamas „x“ grindis ant grunto ribojantis sienos storis (m).



**2.5 pav.** Grindų ant grunto vertikaliojo pakraščių apšiltinimo schema (STR 2.01.09:2012)

**Fig. 2.5.** Diagram of insulation of floor on soil with vertical thermo-insulation layer at edges (STR 2.01.09:2012)

Pirmiausia apskaičiuojama  $U_{02,x}$  vertė. Paskui apskaičiuojama atitinkamų „x“ grindų ant grunto papildomosios šiluminės varžos, vertikaliam  $R'_{v.ins,x}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) pakraščių apšiltinimui:

$$R'_{v.ins,x} = R_{v.ins,x} \frac{d_{v.ins,x}}{\lambda_{gr}}; \quad (2.18)$$

čia  $R_{v.ins,x}$  – atitinkamų „x“ grindų vertikalios pakraščių termoizoliacinio sluoksnio šiluminė varža ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ );  $d_{v.ins,x}$  – atitinkamų „x“ grindų vertikalios pakraščių termoizoliacinio sluoksnio storis (m);  $\lambda_{gr}$  – grunto šilumos laidumo koeficientas ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ).  $\lambda_{gr} = 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Apskaičiuojamas atitinkamų „x“ grindų atstojamasis papildomojo apšiltinančio sluoksnio storis (išreikštas grunto sluoksnio storiumi), esant vertikaliam  $d'_{v,x}$  (m) pakraščių apšiltinimui:

$$d'_{v,x} = R'_{v.ins,x} \cdot \lambda_{gr}. \quad (2.19)$$

Apskaičiuojama  $\Psi_{g.e.2,x}$  vertė, priklausanti nuo papildomo pakraščių termoizoliacinio sluoksnio gylio  $D_{v,x}$  (2.5 pav.), apšiltinamų pakraščių šiluminės varžos bei tokio pat storio grunto sluoksnio šiluminės varžos. Kai termoizoliacinis sluoksnis įrengtas pagal pastato perimetrą vertikaliai pamatų vidinėje arba išorinėje pusėje:



$$\Psi_{g.e.2,x} = -\frac{\lambda_{gr}}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot D_{v,x}}{d_{t2,x}} + 1 \right) - \ln \left( \frac{2 \cdot D_{v,x}}{d_{t2,x} + d'_{v,x}} + 1 \right) \right]. \quad (2.20)$$

Kiekvieno mėnesio „ $m$ “ skaičiuojamasis  $\Phi_{H.fg2,m}$  (W) šilumos srautas per pakraščiuose apšiltintas grindis, pagal kurį skaičiuojami energijos poreikiai pastatui šildyti, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\begin{aligned} \Phi_{H.fg2,m} = & \sum_{x=1}^n [(A_{fg2,x} \cdot U_{fg2,x} + P_{2,x} \cdot \Psi_{g.e.2,x}) \cdot (\theta_{iH} - \theta_{e,m}) + \\ & \hat{\theta}_e \cdot \cos(2\pi \cdot \frac{m - \tau - \beta_{2,x}}{12}) \cdot H_{pe2,x}]. \end{aligned} \quad (2.21)$$

čia  $A_{fg2,x}$  – atitinkamų „ $x$ “ grindų ant grunto, kai grindys apšiltintos pakraščiuose, plotas ( $m^2$ );

$H_{pe2,x}$  – kiekvienų „ $x$ “ grindų išoriniai savitieji šilumos nuostoliai;

$U_{fg2,x}$  – atitinkamų „ $x$ “ grindų ant grunto, kai grindys apšiltintos pakraščiuose, skaičiuojamasis šilumos perdavimo koeficientas ( $W/(m^2 \cdot K)$ );

$m$  – atitinkamo metų mėnesio numeris. Pvz sausio mėnesį  $m = 1$ , gruodžio –  $m = 12$ ;

$\tau$  – mėnesio su žemiausia temperatūra numeris,  $\tau = 1$ ;

$\hat{\theta}_e$  – išorės oro temperatūros metinė amplitudė ( $10,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

$\beta_{2,x}$  – rodiklis, įvertinantis šilumos srauto per atitinkamas „ $x$ “ grindis ant grunto pokyčio vėlavimą lyginant su išorės oro temperatūros pokyčiu (mėnesiai):

$$\beta_{2,x} = 1,5 - 0,42 \cdot \ln \left( \frac{\delta}{d_{t2,x} + 1} \right); \quad (2.22)$$

čia  $d_{t2,x}$  – apskaičiuojamas pagal (2.17) formulę;  $\delta$  – grunto periodinio praskverbimo gylio  $\delta$  (m) vertė imama  $\delta = 3,2$  m.

Atitinkamų  $x$  grindų išoriniai savitieji šilumos nuostoliai  $H_{pe2,x}$  (W/K), kai grindų pakraščiuose įrengtas vertikalus termoizoliacinis sluoksnis, apskaičiuojami pagal formulę:

$$H_{pe2,x} = 0,37 \cdot P_{2,x} \cdot \lambda_{gr} \cdot \left[ \frac{\left( 1 - e^{-2 \cdot \frac{D_{v,x}}{\delta}} \right) \cdot \ln \left( \frac{\delta}{d_{t2,x} + d'_{v,x}} + 1 \right) + e^{-2 \cdot \frac{D_{v,x}}{\delta}} \cdot \ln \left( \frac{\delta}{d_{t2,x}} + 1 \right)}{\right]}. \quad (2.23)$$

Kiekvieno mėnesio „ $m$ “ skaičiuojamieji  $Q_{H,fg,m}$  (kWh/(m<sup>2</sup>·mėn.)) šilumos nuostoliai per su gruntu besiribojančias pastato atitvaras, pagal kuriuos skaičiuojami energijos poreikiai pastatui šildyti, apskaičiuojami pagal formulę:

$$Q_{H,fg,m} = \frac{0,001 \cdot t_m \cdot 24}{A_p} \cdot \Phi_{H,fg2,m} \quad (2.24)$$

Metinės skaičiuojamosios energijos sąnaudos  $Q_{metinės}$  (kWh/(m<sup>2</sup>·metai)) per išorės atitvaras apskaičiuojamos taip:

$$Q_{metinės} = \sum_{m=1}^{12} \frac{Q_{H,x}}{\eta_{hs}}; \quad (2.25)$$

čia  $Q_{H,x}$  – kiekvieno mėnesio „ $m$ “ skaičiuojamieji  $Q_{H,x}$  (kWh/(m<sup>2</sup>·mėn.)) šilumos nuostoliai per pastato atitvaras (atskirai stogui, sienoms ir grindims ant grunto), pagal kuriuos skaičiuojami energijos poreikiai pastatui šildyti;

$\eta_{hs}$  – skaičiuojamasis pastato šildymo sistemos naudingumo koeficientas kai pastatui šildyti naudojamas vienas šilumos šaltinis (vnt.):

$$\eta_{hs} = \eta_1 \cdot \eta_2; \quad (2.26)$$

čia  $\eta_1$  – pastato šildymo sistemos reguliavimo įtaisų skaičiuojamasis naudingumo koeficientas (vnt.). Imamas iš 2.10 lentelės;  $\eta_2$  – pastato šildymo sistemos šilumos šaltinio skaičiuojamasis naudingumo koeficientas, (vnt.). Imamas iš 2.11 lentelės.

Šiame darbe bus vertinami keturi pagrindiniai šilumos šaltiniai: šilumos tinklai, dujinis katilas, kietojo kuro katilas, šildymas elektra.

Metinės skaičiuojamosios pirminės energijos sąnaudos  $Q_{pirminės}$  (kWh/(m<sup>2</sup>·metai)) per išorės atitvaras apskaičiuojamos taip:

$$Q_{pirminės} = \sum_{m=1}^{12} \frac{Q_{H,x}}{\eta_{hs}} \cdot (f_{PRn} + f_{PR,r}); \quad (2.27)$$

čia  $f_{PRn}$  – energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių neatsinaujinančiosios pirminės energijos faktorius, vnt. (2.12 lentelė);  $f_{PRn}$  – energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių atsinaujinančiosios pirminės energijos faktorius, vnt. (2.12 lentelė).

**2.10 lentelē.** Šildymo sistemos reguliavimo ietaisų skaičiuojamojo naudingumo koeficiento  $\eta_1$  vertės (STR 2.01.09:2012)

**Table 2.10.** Values of the estimated efficiency coefficient of control devices of a heating system  $\eta_1$  (STR 2.01.09:2012)

Reguliavimo ietaisų apibūdinimas	$\eta_1$ koeficiento vertės
Nėra šildymo sistemos reguliavimo ietaisų	0,88
Reguliavimo ietaisai įrengti taip, kad apima viso pastato patalpų šildymo reguliavimą, tačiau yra tik termostatiniai šildymo prietaisų ventiliai arba tik patalpų arba išorės termostatas	0,93
Reguliavimo ietaisai įrengti taip, kad apima viso pastato patalpų šildymo reguliavimą. Yra termostatiniai šildymo prietaisų ventiliai ir patalpų arba išorės termostatas	0,98
Reguliavimo ietaisai įrengti taip, kad neapima viso pastato patalpų šildymo reguliavimo	0,90

**2.11 lentelē.** Šilumos šaltinio skaičiuojamojo naudingumo koeficiento  $\eta_2$  vertės (STR 2.01.09:2012)

**Table 2.11.** Values of the estimated efficiency coefficient of a heat source  $\eta_2$  (STR 2.01.09:2012)

Šilumos šaltinio apibūdinimas	$\eta_2$ koeficiento vertės
Šilumos tinklai, rankinis reguliavimas	0,9
Šilumos tinklai, automatinis reguliavimas	1,0
Dujinis katilas, rankinis reguliavimas	0,8
Dujinis katilas, automatinis reguliavimas	0,94
Kietojo kuro katilas, rankinis reguliavimas	0,7
Kietojo kuro katilas, automatinis reguliavimas	0,85
Šildymas elektra, rankinis reguliavimas	0,9
Šildymas elektra, automatinis reguliavimas	1,0

**2.12 lentelė.** Pirminės energijos faktorių vertės (STR 2.01.09:2012)

**Table 2.12.** Values of primary energy factors (STR 2.01.09:2012)

Eil. Nr.	Energijos šaltinis	$f_{PRn}$ , vnt	$f_{PRn}$ , vnt
1	Šiluma iš šilumos tinklų (Lietuvos vidurkis)	0,91	0,40
2	Gamtinės dujos	1,1	0,0
3	Biokuras (mediena, šiaudai, biodujos, bioalyva ir kt.)	0,1	1,0
4	Elektros įvairių gamybos būdų vidurkis	2,8	0,0

Kasmetiniai sutaupymai  $\Delta S$ , €/( $m^2 \cdot$  metai) apskaičiuoti pagal formulę:

$$\Delta S = (Q_{metinis1} - Q_{metinis2}) \cdot E; \quad (2.28)$$

čia  $Q_{metinis1}$  – metiniai skaičiuojamieji šilumos nuostoliai per pastato atitvaras, nepašilintus konstrukcijų, kWh/( $m^2 \cdot$  metai);  $Q_{metinis2}$  – metiniai skaičiuojamieji šilumos nuostoliai per pastato atitvaras, pašilintus konstrukcijas, kWh/( $m^2 \cdot$  metai);  $E$  – šilumos energijos kaina, €/kWh.

### 2.3. Optimalios kainos nustatymo pagal bendrąsias sąnaudas analizė

Sąnaudų atžvilgiu optimalūs lygiai skaičiuojami laikantis makroekonominio arba finansinio požiūrio aspektų (pagal ES reglamento Nr. 244/2012 reikalavimus). Šiame darbe autorius siūlo naudoti integruotą mikro- ir makroekonominį vertinimą, kurio algoritmas pateiktas 2.1 paveiksle.

Nustatant varianto bendras išlaidas atliekant finansinį skaičiavimą, atsižvelgiama į vartotojo mokamas kainas, įskaitant visus taikomus mokesčius, taip pat ir PVM. Geriausiu atveju į skaičiavimą turi būti įtrauktos ir skirtingiems variantams teikiamos valstybės subsidijos.

Skaičiuojant bendras išlaidas pastatams ir pastatų dalims sudedamos įvairių rūšių išlaidos ir joms taikoma diskonto norma, t. y. jos dauginamos iš diskonto koeficiento, kad jas būtų galima išreikšti laikotarpio pradžios metų vertės ir diskontuotos likutinės vertės suma:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau30} (C_{a,I}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau0}(j) \right]; \quad (2.29)$$

čia  $\tau_{30}$  – skaičiavimo laikotarpis (30 metų);  $C_g(\tau)$  – bendros išlaidos (nuo laikotarpio pradžios metų  $\tau_0$ ) per 30 metų skaičiavimo laikotarpį;  $C_I$  – su priemone ar priemonių rinkiniu  $j$  susijusios pradinė investicijų išlaidos;  $C_{a,I}(j)$  – su priemone ar priemonių rinkiniu  $j$  susijusios metinės išlaidos  $i$  metais;  $V_{f,\tau_0}(j)$  – su priemone ar priemonių rinkiniu  $j$  susijusi likutinė vertė skaičiavimo laikotarpio pabaigoje (diskontuota laikotarpio pradžios metams  $\tau_0$ );  $R_d(i)$  – diskonto koeficientas  $i$  metais, atitinkantis diskonto normą  $r$  ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p; \quad (2.30)$$

čia  $p$  – metų skaičius nuo laikotarpio pradžios;  $r$  – tikroji diskonto norma.

Nustatant varianto bendras išlaidas atliekant makroekonominį skaičiavimą, atsižvelgiama į kainas be visų mokesčių, PVM ir subsidijų, taip pat įvertinamos išlaidos dėl išmetamųjų šiltnamio efektą sukeliančių dujų:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau_{30}} ((C_{a,I}(j) \cdot R_d(i)) + C_{c,I}(j)) - V_{f,\tau_0}(j) \right]; \quad (2.31)$$

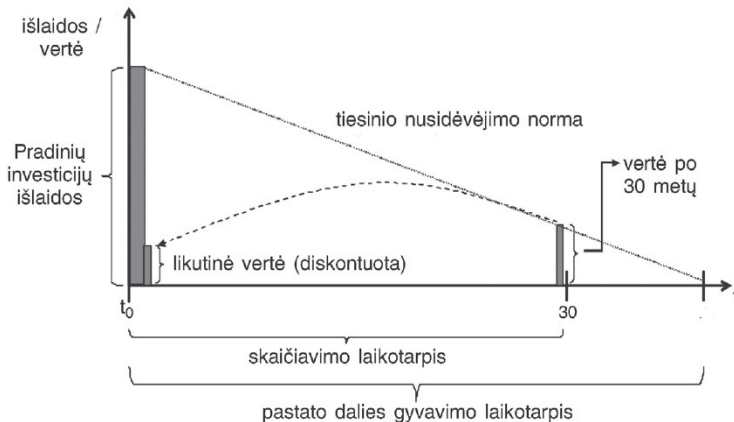
čia  $C_{c,I}(j)$  – su priemone ar priemonių rinkiniu  $j$  susijusios metinės išlaidos dėl išmetamo anglies dioksido  $i$  metais. Europos Komisija (ES reglamentas Nr. 244/2012) rekomenduoja taikyti kasmet išduodamų apyvartinių taršos leidimų kainas už toną CO<sub>2</sub> ekvivalento (bent 20 € už toną CO<sub>2</sub> ekvivalento iki 2025 m., 35 €/t – iki 2030 m. ir 50 €/t – po 2030 m.).

Gyvenamiesiems ir visuomeniniams pastatams ES valstybės narės turi taikyti 30 metų skaičiavimo laikotarpį. Pastato dalių ekonominio gyvavimo ciklas, gali būti nustatomas pagal standartą EN 15459 (2.13 lentelė).

**2.13 lentelė.** Pastatų ir jų dalių ekonominių gyvavimo ciklų trukmės (LST EN 15459:2008)

**Table 2.13.** Buildings and parts of economic life cycles

Eil. nr.	Pastatų ir jų dalių apibūdinimas	Ekonominio gyvavimo ciklo trukmė, metai
1	Nauji pastatai	100
2	Esami modernizuojami, kapitališkai rekonstruojami pastatai	50
3	Išoriniai apdailos sluoksniai	30
4	Langai, durys	30
5	Karšto vandens ruošimo sistema	30
6	Dujinis šildymo katilas; kietojo kuro katilas; šiluminis siurblys	20
7	Kombinuotas tūrinis šildytuvas	20
8	Vandenį šildantis saulės kolektorius	20
9	Cirkuliacinis siurblys	20
10	Akumuliacinė talpa	20
11	Rekuperatorius	15

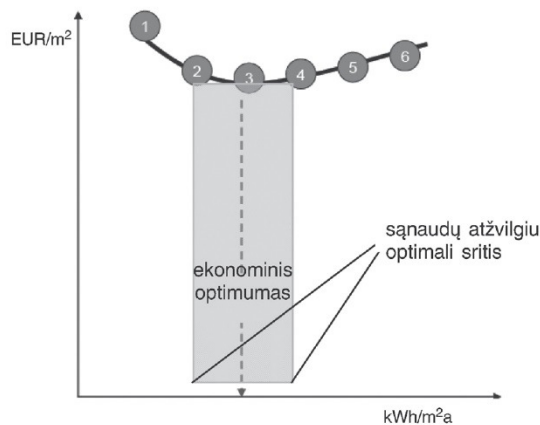


**2.6 pav.** Pastato dalies, kurios gyvavimo laikotarpis ilgesnis nei skaičiavimo laikotarpis, likutinės vertės apskaičiavimas (ES reglamentas Nr. 244/2012)

**Fig. 2.6.** Calculation of the residual value of a building element which has a longer lifetime than the calculation period (EU Regulation Nr. 244/2012)

Skaičiavimo laikotarpį labiau lemia vadinamasis pastato renovacijos ciklas, t. y. laikotarpis, po kurio pastatas kapitališkai renovuojamas, įskaitant viso pastato atnaujinimą ir pritaikymą prie pasikeitusių jo naudotojų reikalavimų (užuoat atlikus vien pakeitimą). Priežastys, dėl kurių atliekama kapitalinė renovacija, paprastai įvairios, o svarbių pastato dalių (pvz., fasado) senėjimas – tik viena iš jų. Šiame darbe termoizoliacinių medžiagų ekonominio gyvavimo terminas priimtas 50 metų, dėl to kad po 50 metų privaloma pastatą modernizuoti arba kapitališkai renovuoti. Pastato dalies, kurios gyvavimo laikotarpis ilgesnis nei skaičiavimo laikotarpis, likutinės vertės apskaičiavimas pateiktas 2.6 paveiksle.

Apskaičiavus energijos sąnaudas ir bendras išlaidas, susijusias su įvairiais variantais, galima nubraižyti kiekvieno energinio naudingumo varianto, kuriuo apibūdinamos su įvairiais sprendimais susijusios pirminės energijos sąnaudos ( $x$  ašyje – pirminė energija kWh/(m<sup>2</sup> metai)) ir bendros išlaidos ( $y$  ašyje – €/m<sup>2</sup>). Iš vertinamų priemonių galima sudaryti konkrečią išlaidų kreivę (įvairių variantų taškais pažymėtos srities apatinė riba). Rinkinių derinys, atitinkantis mažiausias išlaidas, yra žemiausias kreivės taškas („trečias“ rinkinys pateiktame 2.7 pav.). Jo vieta  $x$  ašyje atitinka sąnaudų atžvilgiu optimalų minimalių energinio naudingumo reikalavimų lygį su leidžiama  $\pm 15\%$  riba (ES reglamentas Nr. 244/2012).



**2.7 pav.** Variantų palyginimo grafikas ir sąnaudų atžvilgiu optimalios srities vieta (Boermans, Bettgenhauser *et al.* 2011)

**Fig. 2.7.** Different variants within the graph and position of the cost-optimal range (Boermans, Bettgenhauser *et al.* 2011)

Sąnaudų atžvilgiu optimalūs lygiai *pastato dalims* vertinami keičiant konkrečios pastato dalies energinį naudingumą, kai visi kiti parametrai fiksuoti. Tuomet galima sudaryti grafikus, kuriuose nurodomas pastato dalių (pvz., pastato

stogo) termoizoliacinio sluoksnio storis ( $x$  ašyje, mm) ir bendros išlaidos ( $y$  ašyje, €/m<sup>2</sup>). Sąnaudų atžvilgiu optimalus lygis yra pastato dalies savybės, atitinkančios mažiausias išlaidas.

Norint įvertinti energijos pabrangimo ir tikrosios diskonto normos įtaką įvairiems kitimo scenarijams, darbe yra atliekama jautrumo analizė ir skaičiuojamas patikimumo indeksas. Kadangi patikimumui vertinti galioja normalusis skirstinys, Čekų mokslininkai (Holicky, Markova 2005) siūlo patikimumo indeksą skaičiuoti pagal formulę:

$$\beta_x = \frac{\mu_x}{\sigma_x}; \quad (2.32)$$

čia  $\beta_x$  – priemonės patikimumo indeksas;  $\mu_x$  – priemonių aritmetinis vidurkis:

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (2.33)$$

čia  $\sigma_x$  – priemonių kvadratinė nuokrypa:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2}; \quad (2.34)$$

čia  $x_i$  – vertinamoji priemonė.

Priemonės vertinimas yra patikimas, kai galioja sąlyga:

$$\beta_x > \beta_n; \quad (2.35)$$

čia  $\beta_n$  – norminis patikimumo indeksas (žr. 2.14 lentelę).

#### 2.14 lentelė. Patikimumo indekso klasifikacija (LST EN 1990:2004)

**Table 2.14.** Reliability classification (LST EN 1990:2004)

Patikimumo klasės	Ekonominė, socialinė ir aplinkosauginė žala	Norminis patikimumo indeksas $\beta_n$		Statinių kategorijos
		1 metų periodui	50 metų periodui	
3 – aukšta	Didelė	5,2	4,3	Visuomeniniai pastatai
2 – normali	Vidutinė	4,7	3,8	Gyvenamieji pastatai
1 – žema	Maža	4,2	3,3	Žemės ūkio pastatai



Taigi skaičiuojant 50 metų ekonominiam gyvavimo ciklui, norminis patikimumo indeksas  $\beta_n$  yra lygus 3,8.

Skaičiuojant sąnaudų atžvilgiu optimalią kainą bei priemonių efektyvumą yra vertinama projekto grynoji dabartinė vertė (GDV). Grynoji dabartinė vertė (*angl. net present value, NPV*) yra skirtumas tarp diskontuotų investicinio projekto išlaidų ir įplaukų (Tamaševič 2010):

$$NPV = \sum_{t=t_n}^T \frac{CF(t)}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^{t_c} \frac{I(t)}{(1+d)^t}; \quad (2.36)$$

čia  $NPV$  – grynoji dabartinė vertė (GDV);  $CF(t)$  – pinigų srautas laikotarpiu  $t$ ;  $d$  – diskonto norma;  $T$  – investicinio projekto gyvavimo laikotarpis;  $t_n$  – pradžios laikotarpis;  $t_c$  – pabaigos laikotarpis;  $I(t)$  – išlaidos laikotarpiu  $t$ .

GDV matuojama pinigine išraiška ir parodo absoliutų projekto efektyvumą esant nustatytai diskonto normai. Jei GDV yra neigiama ( $GDV < 0$ ), investicinis projektas laikomas neefektyviu, nes tokiu atveju investuotojas patiria nuostolius. Kai GDV yra teigiama ( $GDV > 0$ ), projektas laikomas efektyvu, o investuotojas gauna teigiamą grąžą. Kai  $GDV = 0$  (esant lūžio taškui), galima skaičiuoti projekto pradinių investicijų atsipirkimo laiką. Darbe taip pat yra vertinamas pradinių investicijų (GDV1) ir eksploataavimo (GDV2) efektyvumas (grynoji dabartinė vertė), atsižvelgiant į priemonės ekonominio gyvavimo laiką.

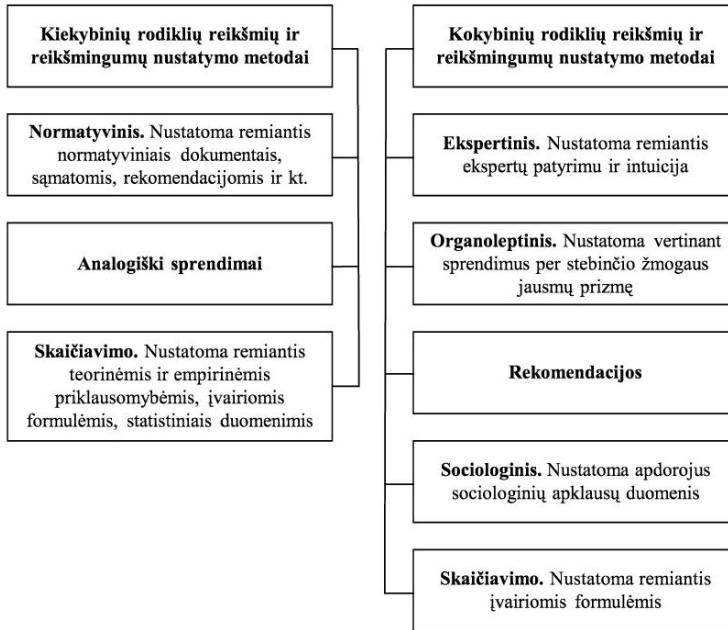
Norint apskaičiuoti projekto GDV būtina atsižvelgti į tam tikras prielaidas (Tamaševič 2010; Ustinovičius, Zavadsakas 2004):

- yra vienintelė tikslo funkcija;
- kapitalo investicijos laikomos išlaidomis ir mažina pinigų srautą;
- įplaukos ir išmokos vertinamos tuo pačiu laiko momentu;
- yra tobula kapitalo rinka;
- išlaidoms nepriskiriamos kapitalo investicijos dėl projekto įgyvendinimo (jos laikomos prarastomis išlaidomis);
- apibrėžtas ir pagrįstas investicinio projekto eksploataavimo laikotarpis;
- laikotarpio pabaigoje nustatoma likvidacinė vertė.

## 2.4. Rodiklių reikšmingumų nustatymas

Kadangi nagrinėjamos mokslinės problemos (klimato faktoriai, energinio ir ekonominio naudingumo kriterijai) yra kompleksiško pobūdžio, todėl toliau darbe siūloma taikyti daugiatislius sprendimų priėmimo metodus.

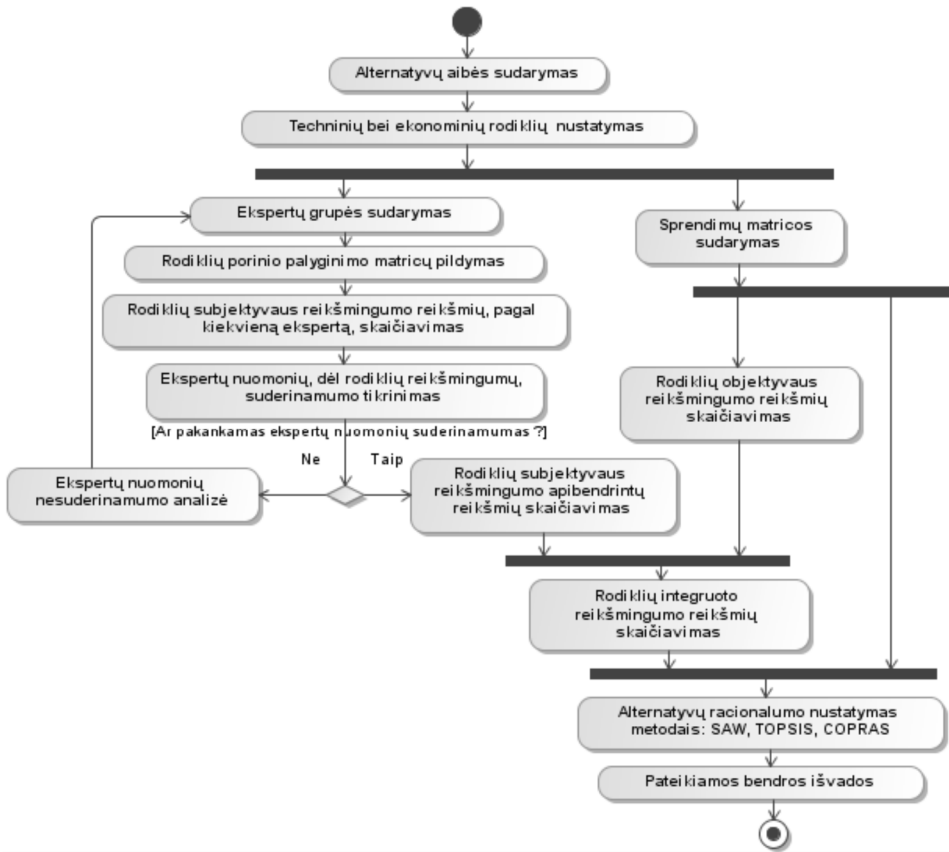
Taikant daugiatislius sprendimo priėmimo metodus, visų pirma nustatomi rodiklių reikšmingumai, kurie rodo tam tikro rodiklio svarbą nagrinėjamai problemai. Šiuo metu plačiausiai taikomi rodiklių reikšmių ir reikšmingumo nustatymo metodai pateikti 2.15 paveiksle.



**2.15 pav.** Rodiklių reikšmių ir reikšmingumų nustatymo metodai  
(Šapauskas 2004)

**Fig. 2.15.** Determination methods of indicators values and weights  
(Šapauskas 2004)

Rodiklių reikšmingumas, pagal nustatymo būdą gali būti skirstomas į subjektyvų, objektyvų ir integruotą reikšmingumą. 2007 m. (Ustinovičius *et al.* 2007) pasiūlytas daugiatisliu metodų kompleksas (MCDM-1), leidžiantis sudaryti efektyvumo rodiklių sudėtingų problemų sprendimo metodiką, apimančią daugelį efektyvumo rodiklių: subjektyvių, objektyvių ir integruotų rodiklių sistemas. Daugiatisliu metodų veiklos diagrama pateikta 2.16 paveiksle.



**2.16 pav.** Daugiatikslių metodų veiklos diagrama  
(Ustinovičius, Zavadskas 2004, Simavičienė 2011)

**Fig. 2.16.** An activity diagram of multiple attribute decision making methods  
(Ustinovičius, Zavadskas 2004, Simavičienė 2011)

*Rodiklių subjektyvus reikšmingumas*, nurodo jį nustatančio eksperto subjektyvų požiūrį į rodiklių svarbą. Subjektyvus reikšmingumas gali būti nustatomas ekspertiniu porinio palyginimo metodu, kurį pateikė T. Saaty (Saaty 1980). Šis metodas patogus tuo, kad ekspertas gali lyginti rodiklius tarpusavyje po du. Prioritetui nustatyti naudojama pačio autoriaus pasiūlyta reikšmingumų skalė (žr. 2.15 lentelę).

**2.15 lentelė.** T. Saaty svarbumo skalės aprašas (Saaty 1997)  
**Table 2.15.** A scale of importance (Saaty 1997)

Svarbumo lygis	Apibrėžimas
1	Rodikliai vienodai svarbūs
3	Vienas rodiklis truputį svarbesnis už kitą
5	Vienas rodiklis svarbesnis už kitą
7	Vienas rodiklis daug svarbesnis už kitą
9	Vienas rodiklis nepalyginti svarbesnis už kitą
2,4,6,8	Tarpinės reikšmės

Ekspertinės porinių rodiklių palyginimo anketos (lentelės) pildomos šiuo principu: eilutėje esantis rodiklis lyginamas su stulpelyje esančiais rodikliais. Turint ekspertų užpildytas rodiklių porinio palyginimo anketas, sudaromos matricos, kurios naudojamos efektyvumo rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmių apskaičiavimui.

Rodiklių *subjektyvius* reikšmingumus galima apskaičiuoti šiais etapais:

*1 etapas.* Tarkime, turime  $m$  alternatyvų, aprašomų  $n$  rodikliais. Rodiklių  $X_i$  ir  $X_j$  porinis lyginimas žymimas  $b_{ij}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ . Simbolis  $b_{ij}$  reiškia  $i$ -tojo ir  $j$ -ojo rodiklių rangų santykį, kurį pateikia ekspertas:

$$b_{ij} = \frac{\bar{q}_i}{\bar{q}_j} \quad (2.37)$$

Kai ekspertai nustato skaitines tarpusavio prioritetiškumo reikšmes (rangų santykius), vertinimo rezultatai surašomi į matricą  $B$ :

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_1} & \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_2} & \dots & \frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_n} \\ \frac{\bar{q}_2}{\bar{q}_1} & \frac{\bar{q}_2}{\bar{q}_2} & \dots & \frac{\bar{q}_2}{\bar{q}_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{q}_n}{\bar{q}_1} & \frac{\bar{q}_n}{\bar{q}_2} & \dots & \frac{\bar{q}_n}{\bar{q}_n} \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

*2 etapas.* Skaitinės rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmės  $\bar{q}_j$ , ( $j = \overline{1, n}$ ) nustatomos mažiausių kvadratų metodu (Chu *et al.* 1979; Hwang, Yoon 1981; Ustinovičius, Zavadskas 2004), sprendžiant optimizavimo uždavinį. Bendrai lygčių sistema užrašoma matricine forma:

$$C \cdot Q = m; \quad (2.39)$$

čia  $Q = (\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_n, \lambda)^T$  – rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmių, su  $\lambda$  – Lagranžo daugikliu, vektorius stulpelis;  $m = (0, 0, \dots, 0, 1)^T$  – atitinkamas laisvųjų narių stulpelis. Matricą  $C_{[(n+1)(n+1)]}$  sudaro elementai  $l_{ij}$ . Apskaičiuojami pagal formules (Hwang, Yoon 1981; Ustinovičius, Zavadskas 2004):

$$l_{ii} = (n-2) + \sum_{j=1}^n b_{ji}^2, \quad (i, j = \overline{1, n}); \quad (2.40)$$

$$l_{ij} = -(b_{ij} + b_{ji}), \quad (i, j = \overline{1, n}, i \neq j); \quad (2.41)$$

$$l_{k, n+1} = l_{n+1, k} = 1, \quad (k = \overline{1, n}); \quad (2.42)$$

$$l_{n+1, n+1} = 0. \quad (2.43)$$

*3 etapas.* Subjektyvių reikšmingumų atsakymai yra patikimi, jeigu ekspertų nuomonių dėl rodiklių rangavimo suderinamumas yra pakankamas. Daugelis mokslininkų (Zavadskas 1987; Ustinovičius, Jakučionis 2000; Ginevičius, Podvezko 2004; Simanavičienė 2011 ir kt.) ekspertų nuomonių suderinamumui apskaičiuoti taiko konkordancijos koeficiento  $W$  metodiką (M. Kendal 1970). Konkordancijos koeficiento reikšmė apskaičiuojama pagal formulę:

$$W = \frac{12 \cdot S}{r^2 \cdot (n^3 - n)}; \quad (2.44)$$

čia  $S$  – rodiklių rangų sumų nuokrypių, nuo bendro vidurkio, kvadratų suma:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^r c_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r c_{ij} \right)^2; \quad (2.45)$$

čia  $r$  – ekspertų skaičius,  $n$  – rodiklių skaičius,  $c_{ij}$  –  $i$ -tojo rodiklio rango reikšmė, kurią suteikė  $j$ -asis ekspertas (Podvezko 2005; Simanavičienė, 2011).

Konkordancijos koeficiento reikšmingumas gali būti nustatytas, naudojant  $\chi^2$  kriterijų:

$$\chi^2 = W \cdot r \cdot (n-1) = \frac{12S}{r \cdot n \cdot (n+1)}. \quad (2.46)$$

Jeigu gauta  $\chi^2$  reikšmė didesnė už  $\chi_{krit}^2$  reikšmę (priklausančią nuo laisvumo laipsnio  $\nu = n-1$  ir reikšmingumo lygmens  $\alpha = 0,05$ ), teigiama, kad ekspertų nuomonių suderinamumas yra pakankamas. Taip pat kai  $\alpha > \alpha_p$  (apskaičiuota tikimybė). Jei  $\chi^2 < \chi_{krit}^2$ , teigiama, kad ekspertų nuomonių suderinamumas nėra pakankamas.

4 etapas. Kai ekspertų nuomonių suderinamumas yra pakankamas, rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmės apskaičiuojamos pagal formulę:

$$\bar{q}_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \bar{q}_{ij}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (2.47)$$

Rodiklių objektyvaus reikšmingumo reikšmės nustatomos naudojant objektyvią informaciją ir visiškai neveikiamos asmens nuomonės apie rodiklio svarbą. Šių reikšmingumų nustatymui taikomas entropijos metodas (Ustinovičius, Zavadskas 2004). Sprendimų matricos stulpeliai nurodo rodiklius, eilutės – alternatyvas. Kai sprendimų matricoje yra rodiklių, kuriuos reikia minimizuoti, jie pertvarkomi taikant formulę:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}; \quad (2.48)$$

o rodiklių, kuriuos reikia maksimizuoti, reikšmės paliekamos nepakeistos:  $\bar{x}_{ij} = x_{ij}$ , kai  $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ . Rodikliai, turinys neigiamų reikšmių, keliami kvadratu, o su minuso ženklu dalinami iš vieneto. Taip sudaroma modifikuota matrica:

$$\bar{X} = [\bar{x}_{ij}], \quad (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}). \quad (2.49)$$

Modifikuotos matricos visi elementai normalizuojami pagal formulę:

$$p_{ij} = \frac{\bar{x}_{ij}}{\sum_{i=1}^m \bar{x}_{ij}}, \quad (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}). \quad (2.50)$$

Kai gaunama normalizuota matrica  $\bar{P} = [p_{ij}]$ , nustatomas kiekvieno rodiklio entropijos lygis  $E_j$ :

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \cdot \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}). \quad (2.51)$$

Entropijos reikšmė kinta ribose  $[0, 1]$ , todėl  $j$ -ojo rodiklio kitimo lygis nustatomas skaičiuojant rodiklius:

$$d_j = 1 - E_j, (j = \overline{1, n}). \quad (2.52)$$

Rodiklių objektyvusis reikšmingumas nustatomas pagal formulę:

$$q_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, (j = \overline{1, n}). \quad (2.53)$$

Autoriai Ustinovičius ir Zavadskas (2004) pateikia efektyvumo *rodiklių integruoto reikšmingumo* reikšmių skaičiavimo metodą. Norint apskaičiuoti rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmes  $q_j^*$ , reikia išspręsti šią tiesinių lygčių sistemą:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1^* (\bar{q}_1 q_1 - q_1) + q_2^* \bar{q}_1 q_2 + q_3^* \bar{q}_1 q_3 + \dots + q_n^* \bar{q}_1 q_n + f = 0 \\ q_1^* \bar{q}_2 q_1 + q_2^* (\bar{q}_2 q_2 - q_2) + q_3^* \bar{q}_2 q_3 + \dots + q_n^* \bar{q}_2 q_n + f = 0 \\ q_1^* \bar{q}_3 q_1 + q_2^* \bar{q}_3 q_2 + q_3^* (\bar{q}_3 q_3 - q_3) + \dots + q_n^* \bar{q}_3 q_n + f = 0 \\ \dots \\ q_1^* \bar{q}_n q_1 + q_2^* \bar{q}_n q_2 + q_n^* \bar{q}_3 q_n + \dots + q_n^* (\bar{q}_n q_n - q_n) + f = 0 \\ q_1^* + q_2^* + q_3^* + \dots + q_n^* = 1 \end{array} \right. \quad (2.54)$$

čia  $q_j^*$  – rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmės;  $\bar{q}_j$  – rodiklių subjektyvaus reikšmingumo reikšmės;  $q_j$  – rodiklių objektyvaus reikšmingumo reikšmės;  $f$  – paklaidos koeficientas.

Šiame darbe bus naudojamos rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmės  $q_j^*, (j = \overline{1, n})$ .

## 2.5. SAW metodas

*SAW* – paprastasis adityvus svorių sumavimo metodas (angl. *Simple Additive Weighting*). Šio metodo taisyklės 1968 m. sukūrė MacCrimmon. Metodas žinomas geriausiai, vienas iš paprastesnių ir plačiausiai taikomas (Komarovska 2013).

Nustatant varianto racionalumą, atitinkami normalizuotosios matricos nariai dauginami iš integruotų reikšmingumų ir sumuojami. Racionalaus varianto sandaugų suma bus maksimali:

$$A = \left\{ A_i \left| \max_i \sum_{j=1}^n q_j^* \cdot \bar{x}_{ij} \right. \right\}. \quad (2.55)$$

čia  $\bar{x}_{ij}$  – normalizuota sprendimų priėmimo matrica.

## 2.6. COPRAS metodas

*COPRAS* – daugiatis kompleksinio proporcingumo metodas (angl. *Complex Proportional Assessment*). Šis metodas sukurtas 1996 m. (Zavadskas, Kaklauskas 1996), o jo pagrindinis principas – lyginamųjų alternatyvų santykinis reikšmingumas  $Q_i$  nustatomas remiantis juos apibūdinančiomis teigiamomis  $S_{+i}$  ir neigiamomis  $S_{-i}$  savybėmis. Kuo  $Q_i$  reikšmė didesnė, tuo alternatyva labiau atitinka sprendimą priimančio asmens poreikius. *COPRAS* metodo sprendimas atliekamas etapais:

*1 etapas.* Sudaroma normalizuota sprendimų matrica  $D$ . Jos nariai apskaičiuojami pagal formulę:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} \cdot q_j^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}); \quad (2.56)$$

čia  $x_{ij}$  –  $j$  sprendimo alternatyvos  $i$  rodiklio reikšmė;  $q_j^*$  – rodiklių integruoto reikšmingumo reikšmė.

*2 etapas.* Apskaičiuojamos  $i$ -tosios alternatyvos maksimizuojamų  $S_{+i}$  ir minimizuojamų rodiklių  $S_{-i}$  sumos:

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^k d_{ij}, \quad S_{-i} = \sum_{j=1+k}^n d_{ij}, \quad (i = \overline{1, m}); \quad (2.57)$$

čia  $k$  – maksimizuojamų rodiklių skaičius;  $n-k$  – minimizuojamų rodiklių skaičius.



3 etapas. Lyginamųjų variantų santykinis reikšmingumas  $Q_i$  nustatomas pagal formulę:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-\min} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{S_{-\min}}{S_{-i}}}, \left(i = \overline{1, m}\right). \quad (2.58)$$

4 etapas. Nustatomas alternatyvų prioritetiškumas (suringuojamos alternatyvos). Kuo didesnis  $Q_i$ , tuo didesnis alternatyvos efektyvumas.

Analizuojant šio metodo galimybes, buvo apžvelgti mokslinių tyrimų statybos inžinerijos uždaviniams spręsti pavyzdžiai (2.16 lentelė).

**2.16 lentelė.** COPRAS metodo taikymas statybos srityje 2010–2013 metais (Kildienė, 2014)

**Table 2.16.** Application of COPRAS method in 2010–2013 by field of civil engineering (Kildienė, 2014)

Autorius	Sprendžiamoji problema
Staniunas <i>et al.</i> (2013)	Daugiabučių namų atnaujinimo ekologinė ir ekonominė analizė
Lapinskiene, Martinaitis (2013)	Pastato atitvarų optimizavimo modelis
Volvačiovos <i>et al.</i> (2013)	Viešųjų pastatų modernizavimo strategija
Zolfani <i>et al.</i> (2013)	Tvari plėtra kaimo vietovėse
Tamosaitiene, Gaudutis (2013)	Kompleksinis aukštybinių pastatų vertinimas
Bitarafan <i>et al.</i> (2012)	Šaltai formuotų plieno konstrukcijų rekonstravimo metodai
Zavadskas <i>et al.</i> (2012b)	Polinių kolonų statybos technologijos parinkimas
Medineckiene, Bjork (2011)	Renovacijos projektų prioriteto parinkimas
Kildiene <i>et al.</i> (2011)	Europos valstybių statybos sektoriaus vertinimas
Chatterjee <i>et al.</i> (2011)	Statybos medžiagų parinkimas

## 2.7. TOPSIS metodas

TOPSIS – artumo idealiajam taškui sprendimo priėmimo metodas (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Šio metodo autoriai Yoon ir Hwang 1981 m. sukūrė metodiką, kuri pagrįsta principu – geriausia alternatyva

turi turėti mažiausią atstumą iki idealiai geriausio sprendimo ir didžiausią atstumą iki idealiai blogiausio sprendimo. Tai antras pagal populiarumą ir dažniausiai taikomas daugiatikslis sprendimo metodas. TOPSIS metodo sprendimas atliekamas etapais, sudarant sprendimų matricą (kurioje eilutės žymi alternatyvas, stulpeliai – efektyvumo rodiklius).

Nustatomas kiekvieno  $i$ -tojo varianto santykinis atstumas iki idealaus:

$$K_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}, \quad (i = \overline{1, m}); \quad (2.59)$$

čia  $i$  – alternatyvos numeris, vnt.;  $m$  – alternatyvų skaičius, vnt.;  $L_i^+$  – atstumas tarp lyginamosios ir idealiai geriausios alternatyvos;  $L_i^-$  – atstumas tarp lyginamosios ir idealiai blogiausios alternatyvos;  $K_i$  – alternatyvos santykinis atstumas iki idealaus.

Sudaroma prioritetų eilutė (ranguojamos alternatyvos). Kuo didesnis alternatyvos santykinis atstumas iki idealaus, tuo alternatyva yra racionali.

## 2.8. COPELAND metodas ir rezultatų palyginimas

Copeland metodas (Copeland 1951) gali būti naudojamas skirtingais daugiatiksliais vertinimo metodais gautų rezultatų apibendrinimui (Volvačiovos 2014). Rezultatams palyginti yra sudaroma matrica iš skirtingų daugiatiksliais metodais (SAW, COPRAS, TOPSIS) gautų prioritetų eilučių bei efektyvumo rangų (GDV1 ir GDV2). Lyginant vidurkių reikšmes sudaroma kvadratinė matrica, kurioje 1 reiškia, kad alternatyva, kurios eilutėje jis yra, yra geresnė už alternatyvą, kurios stulpelyje jis yra. 0 reiškia, kad alternatyva nėra geresnė arba jų racionalumas vienodas. Geriausia alternatyva (Ustinovičius, Zavadskas 2004) apskaičiuojama pagal formulę:

$$\max_i (\sum P_i - \sum N_i); \quad (2.60)$$

čia kiekvienos alternatyvos santykinio racionalumo reikšmės: „pergalės“  $\sum P_i$  ir „nuostoliai“. Skaičiavimams atlikti naudojama kompiuterinė Microsoft Excel programa. Įvesta sprendimų priėmimo matrica pavaizduota 2.17 paveiksle (grindys ant grunto + gamtinės dujos (GR-E2) vertinimo pavyzdžiu), rezultatai pateikti 2.17 ir 2.18 lentelėse.

Sprendimų priėmimo matrica (integruotas vertinimas)					
Detalių alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	R1	R2	R3	R4	R5
GR1	20	0,460	42,09	2,0	3,08
GR2	50	0,330	33,59	3,3	3,46
GR3	90	0,250	29,58	4,8	4,24
GR4	120	0,200	28,87	5,9	5,04
GR5	200	0,140	31,12	9,1	7,95
GR6	250	0,120	33,80	11,2	10,10
GR7	310	0,100	37,68	13,9	12,33
GR8	400	0,081	44,28	18,4	13,98
GR9	500	0,067	52,24	24,6	14,04
Rodiklių suma	1940	2	333	93	74
Optimizavimo kryptis	min.	min.	min.	min.	Max.
Rodiklių intergruotas reikšmingumas, qj	0,004	0,013	0,960	0,007	0,016

**2.17 pav.** Įvesta sprendimų priėmimo matrica  
**Fig. 2.17.** Introduced decision-making matrix

**2.17 lentelė.** GR-E2 MCDM rezultatų lentelė  
**Table 2.17.** The results of GR-E2 MCDM

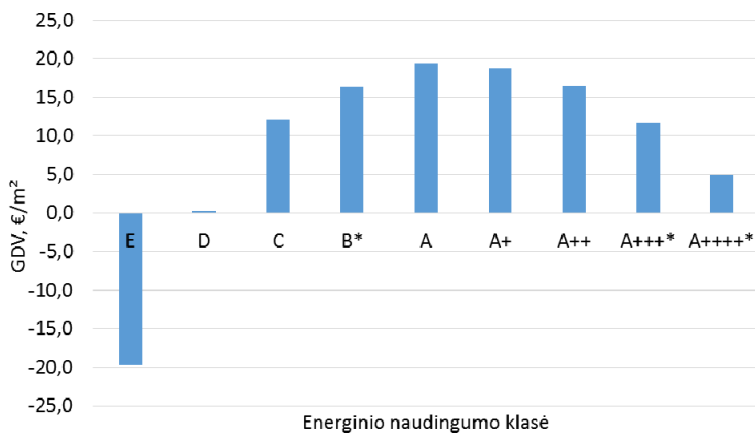
Metodų pavadinimai ir rangai			SAW	Rangai	COPRAS	Rangai	TOPSIS	Rangai
Klasės/ Alternatyvos/ EPS100 storiai, mm								
E	GR1	20	0,675	7	0,093	7	0,435	7
D	GR2	50	0,838	5	0,117	5	0,797	4
C	GR3	90	0,949	2	0,133	2	0,965	2
B*	GR4	120	0,973	1	0,136	1	0,986	1
A	GR5	200	0,908	3	0,127	3	0,902	3
A+	GR6	250	0,840	4	0,118	4	0,788	5
A++	GR7	310	0,760	6	0,107	6	0,623	6
A+++*	GR8	400	0,654	8	0,091	8	0,342	8
A++++*	GR9	500	0,560	9	0,078	9	0,036	9

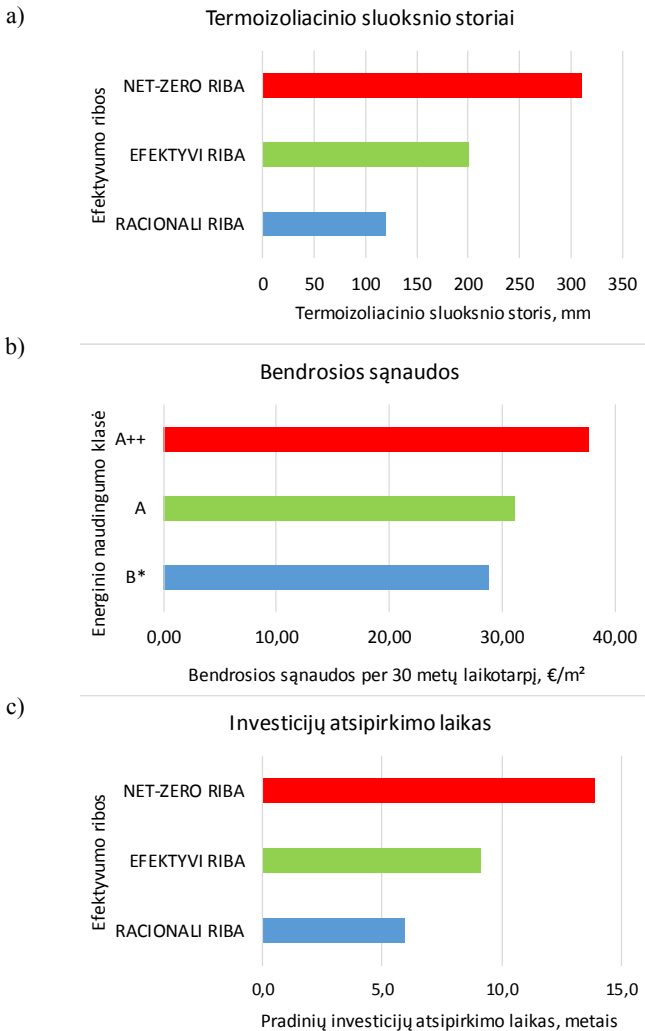
Išsprendus *GR-E2* uždavinį nustatyta, kad geriausia alternatyva (*COPELAND*) yra *GR4* – B\* energinio naudingumo klasė (racionalus *EPS100* storis – 120 mm), antroje vietoje *GR5* – A energinio naudingumo klasė (*EPS100* storis – 200 mm), trečioje vietoje *GR3* – C energinio naudingumo klasė (*EPS100* storis – 90 mm). Jei vertinti tik eksploataavimo efektyvumą (žr. 2.18 pav.), t. y. *efektyvumo ribą (GDV2)*, geriausia alternatyva būtų *GR5*, o tai atitiktų A energinio naudingumo klasės reikalavimus (*EPS100* storis - 200 mm).

**2.18 lentelė.** GR-E2 COPELAND rezultatų lentelė**Table 2.18.** The results of GR-E2 COPELAND

Energinio naudingumo klasė/ Alternatyvos (variantai)/ Termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storis, mm			Metodų rangai						
			SAW	COPRAS	TOPSIS	GDV1**	GDV2**	VIDURKIO	COPELAND
E	GR1	20	7	7	7	9	8	7,60	8
D	GR2	50	5	5	4	8	6	5,60	6
C	GR3	90	2	2	2	5	3	2,80	3
B*	GR4	120	1	1	1	4	1	1,60	1
A	GR5	200	3	3	3	1	2	2,40	2
A+	GR6	250	4	4	5	2	4	3,80	4
A++	GR7	310	6	6	6	3	5	5,20	5
A+++*	GR8	400	8	8	8	6	7	7,40	7
A++++*	GR9	500	9	9	9	7	9	8,60	9

Pastaba\*\*: GDV1 – eksploatavimo efektyvumo rangai, GDV2 – investicijų efektyvumo rangai.

**2.18 pav.** Vidutinis eksploatavimo efektyvumas, kai GDV>0**Fig. 2.18** The average exploitation efficiency, if NPV> 0



**2.19 pav.** GR-E2 varianto efektyvumo ribų nustatymas: a) termoizoliacinio sluoksnio storiai; b) bendrosios sąnaudos; c) investicijų atsipirkimo laikas

**Fig. 2.19.** Performance Delimitation of GR-E2 alternative:  
a) thermal insulation layers; b) global cost; c) payback time

Palyginus duomenis su energijos beveik nenaudojančio pastato 2021 m. reikalavimais (*Net-Zero riba*), nustatyta, kad projektuoti A++ klasės pastatą, naudojantį gamtinių dujų energiją, grindų ant grunto apšiltinimas yra 23 proc. brangesnis lyginant su racionalia riba ir 17 proc. lyginat su efektyvumo riba (2.19 pav.).

## 2.9. Antrojo skyriaus išvados

1. Energinį ir ekonominį naudingumą reikia kompleksiskai vertinti priimant sprendimus racionaliam termoizoliaciniam sluoksniui parinkti. Šiam tikslui pasiekti pasiūlytas naujas daugiaticslės selektonovacijos integruoto modelio algoritmas.
2. Sprendimų priėmėjams atrenkant efektyviausias alternatyvas svarbu įvertinti tokius rodiklius kaip: termoizoliacinio sluoksnio storis, šilumos perdavimo koeficientas, bendrosios sąnaudos, investicijų atsipirkimo laikas, patikimumo indeksas, eksploatavimo efektyvumas ir pan. Atlikus analizę, nustatyta kad reikia vertinti ir mikro- bei makroekonominės perspektyvas. Todėl pasiūlytas integruotas scenarijų vertinimo algoritmas bei rodiklių vertinimas trimis daugiaticslė sprendimų priėmimo metodais: SAW, COPRAS, TOPSIS ir jungiamasis COPELAND metodas. Pritaikyti trys reikšmingumo nustatymo metodai: subjektyvus, objektyvus ir integruotas.
3. Daugiaticslės sprendimo priėmimo metodai turi privalumų ir trūkumų bei priklauso nuo nagrinėjamos problemos pobūdžio, turimos informacijos, rezultatų gavimo tipo. Sudėtingus uždavinius tikslinga spręsti skirtingais daugiaticslės vertinimo metodais, visapusiškai analizuojančiais konkrečią sprendžiamą problemą.
4. Sudarytas daugiaticslės selektonovacijos integruotas vertinimo modelis, paremtas skirtingais vertinimo metodais. Moksliniu požiūriu toks modelis naudingas tuo, kad kiekvienas sprendimo priėmėjas gali gana greitai rasti racionalų ir moksliniais atrankos metodais pagrįstą sprendimą bei jį palyginti su kitais variantais.

# 3

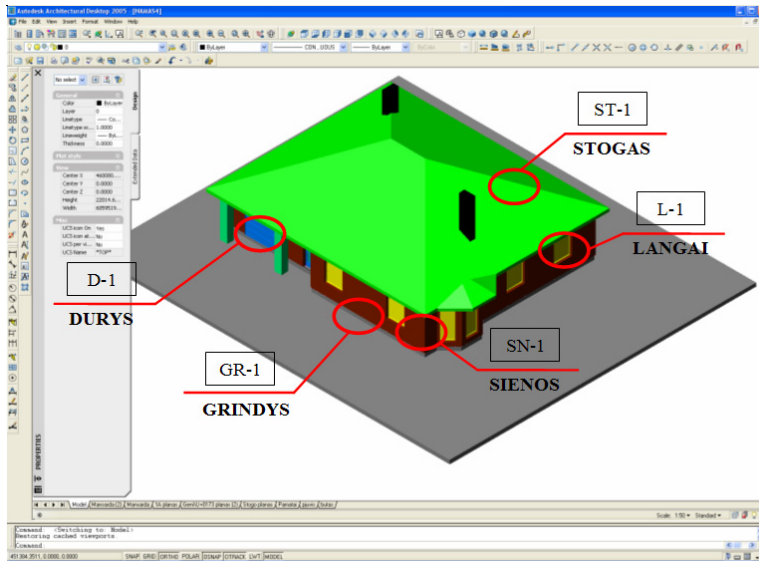
---

## **Daugiatikslės selektonovacijos modelio praktinis taikymas vienbučiam gyvenamajam pastatui**

Remiantis energinio ir ekonominio naudingumo koncepcija bei autoriaus sukurta daugiatikslės selektonovacijos modeliavimo programa TERM-SELECT, darbe praktiškai pritaikytas daugiatikslės selektonovacijos modelio algoritmas ir sukurta naujai statomo vienbučio gyvenamojo pastato (3.1 pav.) tipinių išorės atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankos sistema. Duomenų bazę sudaro trys atskiros pastato išorės atitvarų variantinio projektavimo matricos: grindų ant grunto, sienų ir stogo.

Atskiriems Lietuvos miestams atlikti konkretūs skaičiavimai ir suformuotos sprendimų priėmimo matricos grindų, sienų ir stogo tipinėms konstrukcijoms (žr. A priedą). Toliau darbe bus išanalizuoti projektiniai sprendiniai, tenkinantys (Lietuvos) norminius reikalavimus ir skirti vienam klimatiniam rajonui vertinti.

Šio skyriaus apibendrinta medžiaga paskelbta Avižos *et al.* (2012, 2013a ir 2015a) publikacijose.



3.1 pav. Viebučio gyvenamojo pastato tipinės atitvarinės konstrukcijos  
Fig. 3.1. Typical envelopes of a single-family residential building

### 3.1. Vienbučio gyvenamojo pastato tyrimų modelis

Pradinių sprendimo priėmimo matricos elementų nustatymui buvo sudarytas tyrimų modelis, naudojant tokius pastato projektinius sprendinius:

1. Skaičiavimams priimtas grindų ant grunto plotas  $A = 155,5 \text{ m}^2$  (grindų ploto vidaus matmenys plane  $10,00 \times 15,55 \text{ m}$ ). Kadangi vidutinis vienbučio gyvenamojo pastato naudingasis plotas –  $155,5 \text{ m}^2$  (Lietuvos statistikos departamentas 2015).

2. Pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.09:2012 rekomendacijas, skaičiuojant naudojama grunto periodinio prasiskverbimo gylio  $\delta$  (m) vertė imama  $\delta = 3,2 \text{ m}$ ; grunto šilumos laidumo koeficientas  $\lambda_{\text{gr}} = 2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

3. Pamatų storis  $\omega = 0,3 \text{ m}$ . Grindų ant grunto armuoto betono sluoksnio storis priimtas –  $60 \text{ mm}$ , šilumos laidumo koeficientas –  $2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

4. Pagal statybos taisyklių ST 2124555837.01:2013 „Atitvarų šiltinimas polistireninio putplasčiu“ rekomendacijas, kai grindys gerai apšiltintos visame grindų plote, vertikalsiosios izoliacijos minimalus gylis  $D_v = 0,6 \text{ m}$ , storis priimtas lygus ištininio grindų apšiltinimo storiui.

5. Grindų ant grunto šiltinimui (žr. A priedą) naudojamos polistireninio putplasčio plokštės (EPS100). Šilumos laidumo koeficiento deklaruojama vertė



$\lambda_D = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Šilumos laidumo koeficiento pataisa dėl papildomo medžiagos įdrėkimo grunte (STR 2.01.03:2009) horizontaliajam apšiltinimui  $\Delta\lambda_\omega = 0,006 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  ir vertikaliajam apšiltinimui  $\Delta\lambda_\omega = 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

7. Sienų šiltinimui (žr. A priedą) naudojamos polistireninio putplasčio plokštės (EPS70). Šilumos laidumo koeficiento deklaruojama vertė  $\lambda_D = 0,039 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė priimta:  $0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

8. Šlaitinio stogo šiltinimui priimta tipinė vienbučio gyvenamojo pastato šlaitinio stogo detalė (žr. A priedą), kai hidroizoliacija yra iš vandens garams laidžios (difuzinės) plėvelės, o šiltinimo medžiagos montuojamos tarp medinių gegnių. Vėdinamas oro tarpas įrengtas virš difuzinės plėvelės, ne mažesnis kaip 50 mm. Šiltinti naudojamos universalios akmens vatos plokštės (*Paroc eXtra*). Šilumos laidumo koeficiento deklaruojama vertė  $\lambda_D = 0,036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

9. Stogo medinių gegnių ir tašų storis priimtas 50 mm, o šilumos laidumo koeficiento vertė  $\lambda_m = 0,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

10. Norminės atitvarų šilumos perdavimo koeficiento vertės priimtos pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ reikalavimus, vertinant temperatūros pataisą  $\kappa = 1$  (žr. 1.11 lentelę). Plonų sluoksnių varžos priimtos: išorinių sluoksnių  $R_q = 0,02 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ ; vidinių sluoksnių  $R_q = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$ .

11. Empiriniams tyrimams buvo atrinkti 9 alternatyvų variantai, atitinkantys energinio naudingumo klases: V1 = E, V2 = D, V3 = C, V4 = B\*, V5 = A, V6 = A+, V7 = A++, V8 = A+++\* ir V9 = A++++\* (žr. 3.1, 3.2, 3.3 lentelės). Kur B\* klasės duomenys priimti kaip C ir A klasės aritmetinis vidurkis, o A+++\* ir A++++\* – eksperimentinės klasės, skirtos siekiant pamatyti kaip išsibarsto duomenys esant dideliems termoizoliacinio sluoksnio storiams.

12. Šilumos nuostoliai per atitvaras buvo apskaičiuoti energinio naudingumo sertifikavimo programa – NRG3.

13. Tyrimo metu buvo vertinti 1512 alternatyvų variantai: 3 atitvaros (grindys, sienos ir stogas – žr. A priedą) su 9 energinio naudingumo klasėmis, 4 šilumos šaltiniai – žr. 2.2 lentelę ir 14 scenarijų – žr. 2.3 lentelę.

14. Vertinamosios perspektyvos pateiktos 2.4 lentelėje.

15. Šiame darbe vertinama keturių tipų šiluminė energija: biokuras, gamtinės dujos, šiluminiai tinklai ir elektra. Remiantis Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos (VKEKK) duomenimis 2015 m. vidutinė energijos kaina Lietuvoje pateikta B priede.







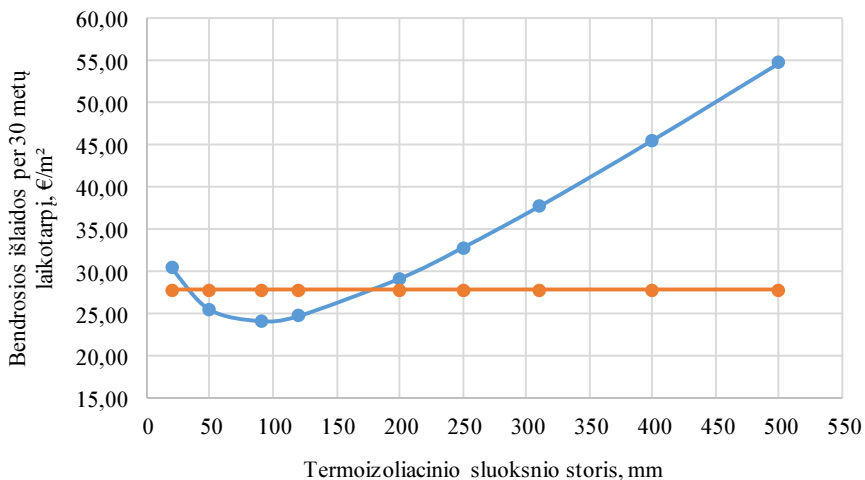
## 3.2. Vertinimo metodologija

Kaip pavyzdys toliau bus pateikta *S3-GR-EI* varianto duomenų apdorojimo eiga.

Nagrinėjamas kodas: *S3-GR-EI* reiškia:

- *S3* – raidė S reiškia scenarijus, skaičius 3 – scenarijaus numeris (nuo 1 iki 14);
- *GR* – raidės GR reiškia grindų atitvara, skaičius 1 – energinio naudingumo klasė E (nuo 1 iki 9, t. y. nuo E iki A++++\* klasės);
- *EI* – raidė E reiškia šilumos šaltinis, skaičius 1 – kietojo kuro katilas (nuo 1 iki 4).

1 žingsnis. Visų pirma apskaičiuojamos grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio bendrosios išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį laikotarpį, po to iš gautų duomenų braižomas grafikas. Žemiausias grafiko taškas – sąnaudų atžvilgiu mažiausia kaina €/m<sup>2</sup> (žr. 3.2 pav.).

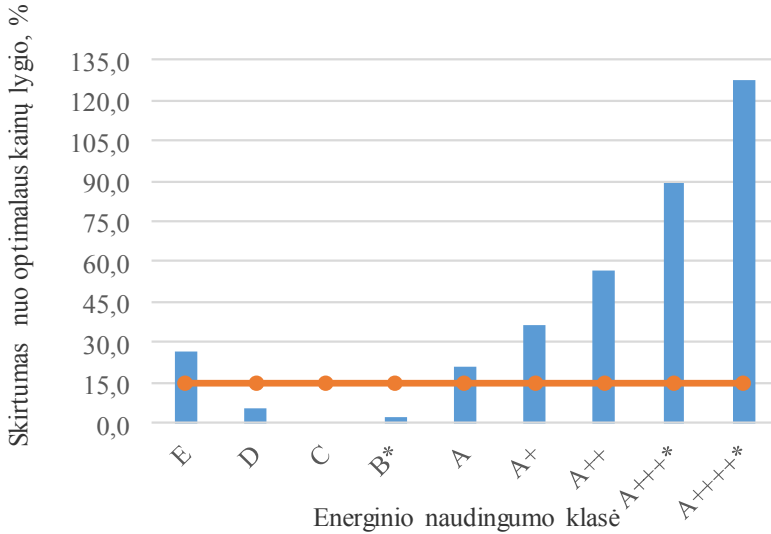


3.2 pav. Scenarijaus *S1-GR-EI* grindų ant grunto racionalaus termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storis

Fig. 3.2. Thermal insulation layers (EPS100) optimum thickness of the ground floor on Scenario *S1-GR-EI*

Iš 3.2 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad esant *S1* scenarijui mažiausios bendrosios išlaidos yra esant 90 mm storio grindų ant grunto atitvaros termoizoliacinio sluoksnio storiui. Tai atitiktų C energinio naudingumo klasės varianto duomenis. Pagal ES direktyvos 2002/91/EB reikalavimus, yra leidžiamos

±15 proc. optimalumo ribos. Į šią kategoriją patenka jau trys energinio naudingumo klasės: *D*, *C* ir *B\** (žr. 3.3 pav.).

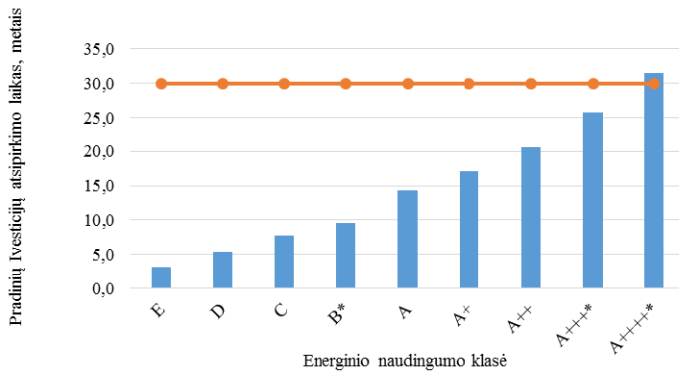


**3.3 pav.** Scenarijaus *SI-GR-EI* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) racionali energinio naudingumo klasė

**Fig. 3.3.** Thermal insulation layers (EPS100) optimum energy performance class of the ground floor on Scenario *SI-GR-EI*

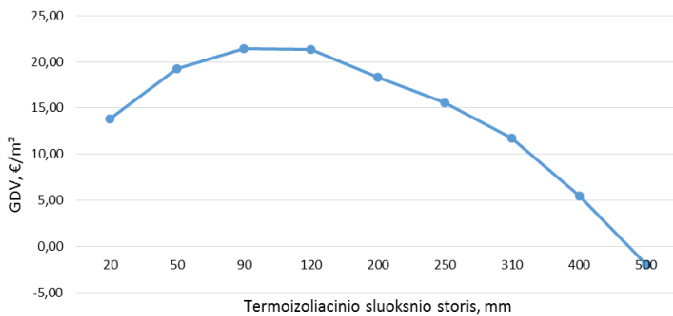
2 žingsnis. Kai grynoji dabartinė vertė (*GDV*) lygi nuliui (lūžio taškas), skaičiuojamas pradinių investicijų atsipirkimo laikas. Jei priemonė viršija 30 metų skaičiuojamąjį laikotarpį, laikoma kad tokia priemonė yra finansiškai neracionali. Kaip matyti iš 3.4 paveikslo esant *SI* scenarijui, grindis ant grunto šiltinti 500 mm storio termoizoliaciniu sluoksniu (*A++++\** klasė), yra neracionalu, nes pradinių investicijų atsipirkimo laikas – 31,5 m.

3 žingsnis. Skaičiuojamas pradinių investicijų ir eksploataavimo efektyvumas. Kai grynoji dabartinė vertė yra teigiama, laikoma kad į tokį projektą verta investuoti, jei  $GDV < 0$ , projektas neefektyvus. Kaip matyti iš 3.5 pav. efektyviausias pradinių investicijų variantas yra *C* energinio naudingumo klasė su 90 mm storio apšiltinimu, tuo tarpu efektyviausias eksploataavimo efektyvumas yra *B\** energinio naudingumo klasės su 120 mm storio apšiltinimu. Neefektyvios energinio naudingumo klasės: *E*, *D*, *A++*, *A+++\** ir *A++++\** (3.6 pav.).



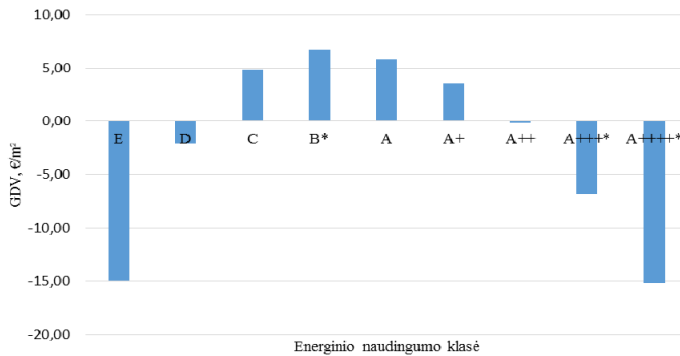
**3.4 pav.** Scenarijaus *SI-GR-EI* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) pradinių investicijų atsipirkimo laikas

**Fig. 3.4.** Thermal insulation layers (EPS100) initial investment payback time of the ground floor on Scenario *SI-GR-EI*



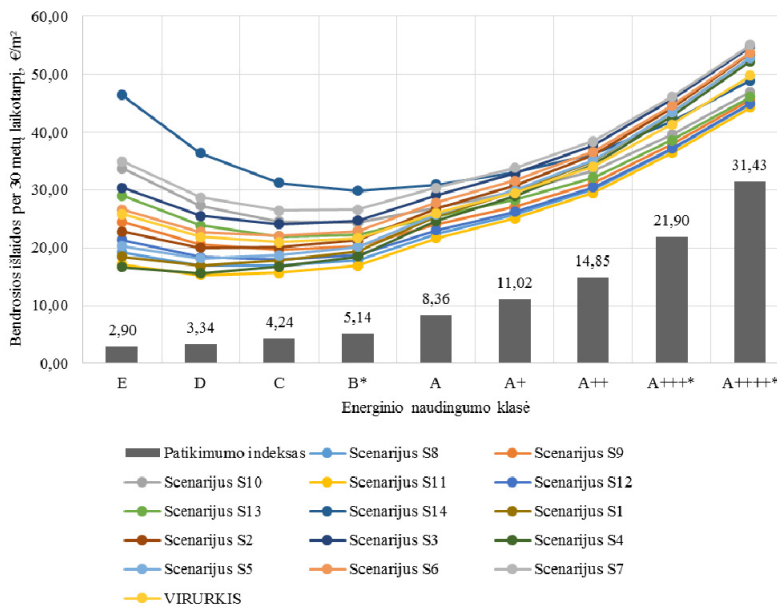
**3.5 pav.** Scenarijaus *SI-GR-EI* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) pradinių investicijų efektyvumas (GDV)

**Fig. 3.5.** Thermal insulation layers (EPS100) initial investment efficiency (NPV) of the ground floor on Scenario *SI-GR-EI*



**3.6 pav.** Scenarijaus *SI-GR-EI* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) eksploataavimo efektyvumas (GDV)

**Fig. 3.6.** Thermal insulation layers (EPS100) operational efficiency (NPV) of the ground floor on Scenario *SI-GR-EI*



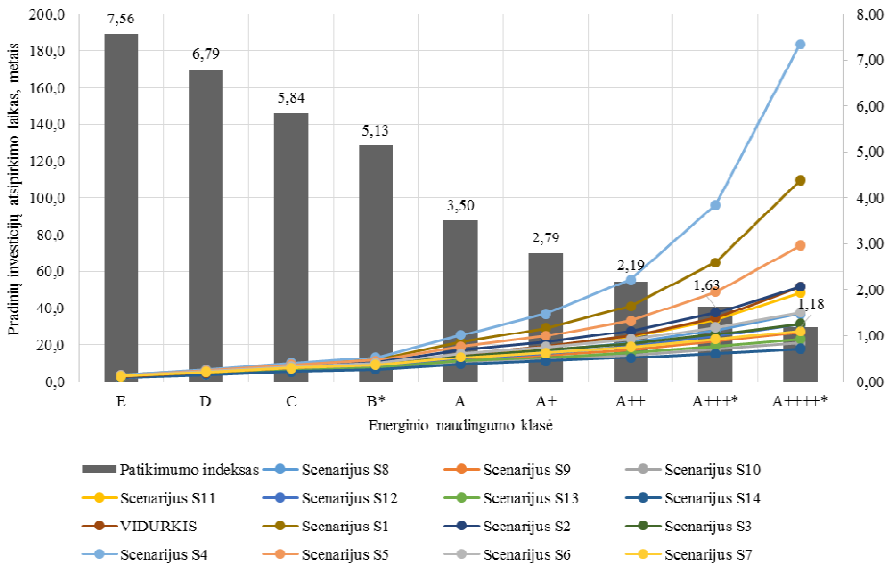
**3.7 pav.** Scenarijaus *GR-EI* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) bendrųjų išlaidų integruoto vertinimo jautrumo analizė

**Fig. 3.7.** Integrated assessment sensitivity analysis of thermal insulation layers (EPS100) of the ground floor global cost on Scenario *GR-EI*



4 žingsnis. Kai apskaičiuojami visų 14 scenarijų duomenys, atliekama jautrumo analizė ir skaičiuojamas patikimumo indeksas. Pagal Europos normų reikalavimus, II lygio pastatų (neypatingi gyvenamieji pastatai), patikimumo indeksas turi būti ne mažesnis už 3,8 (esant 50 metų ekonominiam gyvavimo ciklui). Kaip matyti iš 3.7 pav. grafiko tiriamojo varianto *GR-EI* integruoto vertinimo bendrųjų sąnaudų per 30 metų laikotarpį jautrumo analizės rezultatai, mažiausias patikimumas yra *E* ir *D* energinio naudingumo termoizoliaciniam sluoksniui. Integruotai vertinant *GR-EI* varianto pradinių investicijų atsipirkimo laiką, mažai patikimos visos A energinio naudingumo klasės (žr. 3.8 pav.).

Pavyzdžiui, A++ energinio naudingumo klasei pats nepalankiausias yra S4 optimistinis energijos (biokuro) brangimo scenarijus su 6 proc. tikrąja diskonto norma (mikroekonominis vertinimas), nes, grindis apšiltinus 310 mm termoizoliaciniu sluoksniu, pradinės investicijos atsipirktų tik po 55,5 metų, o tai jau viršija pačios priemonės ekonominį gyvavimo ciklą (50 m). Šiai klasei palankiausias būtų didelių kainų scenarijus S14, o apšiltinimo investicijos atsipirktų po 12,9 metų. Vidutinis (integruotas) pradinių investicijų atsipirkimo laikas A++ klasei (*GR-EI* variantas), įvertinus visus 14 scenarijų – 24,6 metai.

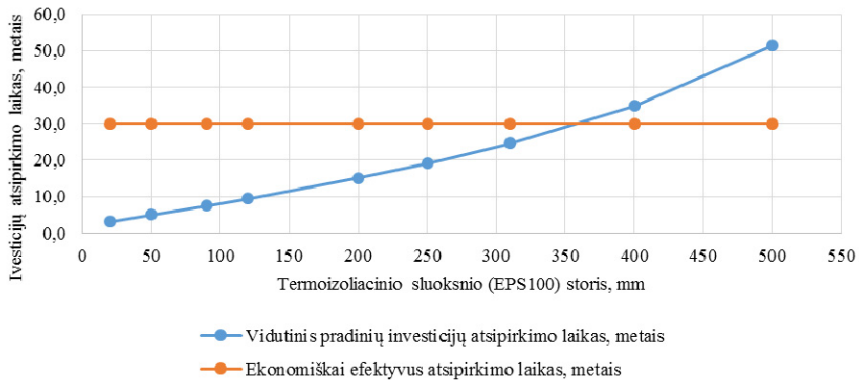


**3.8 pav.** Scenarijaus *GR-EI* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksniu (EPS100) atsipirkimo laiko integruoto vertinimo jautrumo analizė

**Fig. 3.8.** Integrated assessment sensitivity analysis of thermal insulation layers (EPS100) of the ground floor payback time on Scenario *GR-EI*

Toks sprendimas nėra finansiškai patrauklus, tačiau investicijas padengia su-  
taupymai. Jei tektų grindis ant grunto šiltinti 500 mm storio termoizoliaciniu  
sluoksniu (A++++\* klasė, biokuras), esant S4 scenarijui, investicijos atsipirktų tik  
po 183,6 metų (žr. 3.8 pav.). O tai sąnaudų atžvilgiu yra visiškai neracionalus  
sprendimas.

Vidutinis investicijų atsipirkimo laikas (integruotas vertinimas) priklausomai  
nuo termoizoliacinio sluoksnio storio pateiktas 3.9 pav. Kaip matyti iš grafiko,  
grindų ant grunto ekonomišką termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storis – kinta  
iki 350 mm, o daugiau storinti yra ekonomiškai neefektyvu.



**3.9 pav.** Scenarijaus *GR-E1* grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) vidutinis investicijų atsipirkimo laikas

**Fig. 3.9.** The average payback time of thermal insulation layers (EPS100) of the ground floor on Scenario *GR-E1*

5 žingsnis. *GR-E1* variantui įvertinus 14 scenarijų, apskaičiuojamas vidutinis pradinų investicijų (GDV1) ir eksploataavimo (GDV2) efektyvumas atsižvelgiant į grynąją dabartinę vertę. Gauti rezultatai surašomi į 3.4 lentelę ir suranguojami.

**3.4 lentelė.** *GR-E1* efektyvumų rangai

**Table 3.4.** *GR-E1* rankings of effectiveness

Variantų kodas	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9
Energinio naudingumo klasė	E	D	C	B*	A	A+	A++	A++++	A++++*
GDV1, €/m <sup>2</sup>	13,0	18,2	20,3	20,3	17,6	15,1	11,7	6,0	-0,8
Rangai	6	3	2	1	4	5	7	8	9
GDV2, €/m <sup>2</sup>	-11,3	0,1	6,1	7,7	6,8	4,6	1,2	-5,0	-12,6
Rangai	8	6	3	1	2	4	5	7	9

6 žingsnis. Likusiems techniniams-ekonominiams *GR-EI* sprendinio rodikliams įvertinti yra sudaroma daugiatislio rodiklių vertinimo sprendimų priėmimo matrica (žr. 3.5 lentelę).

**3.5 lentelė.** Spendimo priėmimo matrica *GR-EI*  
**Table 3.5.** Decision-making matrix *GR-EI*

Alternatyvos (variantai)	Rodikliai				
	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm	Šilumos perdavimo koef., $W/(m^2 \times K)$	Vidutinė sąnaudų suma per 30 m. laikotarpį, €/m <sup>2</sup>	Vidutinis pradinųjų investicijų atsipirkimo laikas, metais	Patikimumo indeksas, vnt. d.
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
1. E klasės detalė (GR1)	20	0,460	25,82	3,0	3,18
2. D klasės detalė (GR2)	50	0,330	21,88	5,1	3,78
3. C klasės detalė (GR3)	90	0,250	20,98	7,5	4,98
4. B* klasės detalė (GR4)	120	0,200	21,68	9,4	6,13
5. A klasės detalė (GR5)	200	0,140	26,01	15,0	9,46
6. A+ klasės detalė (GR6)	250	0,120	29,47	19,0	11,05
7. A++ klasės detalė (GR7)	310	0,100	34,02	24,6	12,07
8. A+++* klasės detalė (GR8)	400	0,081	41,30	34,8	12,46
9. „++++*“ klasės detalė (GR9)	500	0,067	49,78	51,4	12,35
Min. ar max. rodiklis	Min.	Min.	Min.	Min.	Max.

7 žingsnis. Šiame darbe yra vertinamos integruoto reikšmingumo vertės. Norint nustatyti kiekvieno rodiklio svorį (subjektyvų reikšmingumą) buvo apklausti 12 ekspertų (turintys kvalifikacijos atestatus). Jiems buvo pateiktos apklausos anketos (žr. C priedą). Porinio lyginimo metodu (žr. 2.4 poskyrį) ekspertai palygino

5 nagrinėjamus rodiklius tarpusavyje. Ekspertų apklausos rezultatai pateikti 3.6 lentelėje.

**3.6 lentelė.** Ekspertų apklausos rezultatai (porinio lyginimo metodo rangai)  
**Table 3.6.** Results of the Expert survey (the ranks of pairwise comparison method)

Ekspertas	Rodiklių reikšmingumai				
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$
Ekspertas 1	2	4	1	5	3
Ekspertas 2	3	5	1	4	2
Ekspertas 3	2	4	1	5	3
Ekspertas 4	2	3	1	4	5
Ekspertas 5	3	5	1	4	2
Ekspertas 6	2	4	1	5	3
Ekspertas 7	2	3	1	4	5
Ekspertas 8	2	3	1	4	5
Ekspertas 9	3	5	1	4	2
Ekspertas 10	2	3	1	4	5
Ekspertas 11	2	4	1	5	3
Ekspertas 12	3	5	1	4	2
Rangų suma	28	48	12	52	40
Vidutinis rangas	2,33	4,00	1,00	4,33	3,33

Naudojant konkordancijos koeficientą, buvo apskaičiuotas ekspertų nuomonių suderinamumas (žr. 2.4 poskyrį):

- rodiklių rangų sumų nuokrypių, nuo bendro vidurkio, kvadratų suma:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^r c_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r c_{ij} \right)^2 = 1056;$$

- konkordancijos koeficiento reikšmė:

$$W = \frac{12 \cdot S}{r^2 \cdot (n^3 - n)} = \frac{12 \cdot 1056}{12^2 \cdot (5^3 - 5)} = 0,73 ;$$

- konkordancijos koeficiento reikšmingumas nustatytas, naudojant  $\chi^2$  kriterijų:

$$\chi^2 = W \cdot r \cdot (n - 1) = 0,73 \cdot 12 \cdot (5 - 1) = 35,20;$$

- apskaičiuojamas nuomonių suderinamumas:

$$\alpha = 0,05 \gg \alpha_p = 4,23E - 07 ;$$

- išvada: ekspertų nuomonė suderinta.

Entropijos metodu buvo apskaičiuoti objektyvūs reikšmingumai, nepriklausantys nuo ekspertų nuomonės. Sujungus subjektyvių ir objektyvių reikšmingumų reikšmes, gautas integruotas reikšmingumas (žr. 2.4 poskyrį). Gauti reikšmingumų rezultatai pateikti 3.7 lentelėje.

### 3.7 lentelė. GR-EI varianto rodiklių reikšmingumai

Table 3.7. Criteria weights of GR-EI variant

Alternatyvos (variantai)	Rodiklių reikšmingumai				
	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm	Šilumos perdavimo koef., W/(m <sup>2</sup> ×K)	Vidutinė sąnaudų suma per 30 m laikotarpį, €/m <sup>2</sup>	Vidutinis pradinųjų investicijų atsipirkimo laikas, metais	Patikimumo indeksas, vnt. d.
	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	q <sub>5</sub>
1. Subjektyvus reikšmingumas $\bar{q}_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \bar{q}_{ij}, (i = \overline{1, n})$ .	0,1002	0,0820	0,6502	0,0790	0,0886
2. Objektyvus reikšmingumas $q_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, (j = \overline{1, n})$ .	0,4683	0,1309	0,0299	0,2849	0,0860
3. Intergruotas reikšmingumas $q_j^*, (j = \overline{1, n})$	0,0089	0,0262	0,9102	0,0116	0,0430

8 žingsnis. Daugiatiksliais kiekybiniais sprendimo priėmimo metodais (SAW, COPRAS ir TOPSIS) gautos alternatyvų prioritetų eilutės (žr. 2.5, 2.6, 2.7 poskyrius). Be to šiame etape taip pat vertinamos efektyvumo rodiklių (GDV1 ir GDV2) prioritetų eilutės (žr. 3.4 lentelę). Gauti rezultatai apibendrinami COPELAND (žr. 2.8 poskyrį) metodu. Kaip matyti iš 3.8 ir 3.9 lentelių racionaliausia GR-EI variantui grindis ant grunto šildyti 90 mm (GR3 alternatyva) arba 120 mm (GR4 alternatyva) storio (EPS100) termoizoliaciniu sluoksniu, nes abi alternatyvos pasidalino prioritetų eilutės pirmąja vieta.

**3.8 lentelė.** *GR-EI* variantų alternatyvų rangų lentelė  
**Table 3.8.** Ranking chart of alternatives of *GR-EI* variant

Alternatyvos	Metodai					
	SAW	COPRAS	TOPSIS	GDV1	GDV2	VIDURKIS
GR1	5	5	4	8	6	5,6
GR2	3	3	3	6	3	3,6
GR3	1	1	1	3	2	1,6
GR4	2	2	2	1	1	1,6
GR5	4	4	5	2	4	3,8
GR6	6	6	6	4	5	5,4
GR7	7	7	7	5	7	6,6
GR8	8	8	8	7	8	7,8
GR9	9	9	9	9	9	9,0

**3.9 lentelė.** Kvadratinės matricos lentelė (racionalioji *GR-EI* varianto riba)  
**Table 3.9.** Square Matrix (rational limit of *GR-EI* variant)

Alternatyvos	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9	$\sum P_i$	$\frac{\sum P_i}{\sum N_i}$	COPELAND
GR1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3	-2	6
GR2	1	0	0	0	1	1	1	1	1	6	4	3
GR3	1	1	0	0	1	1	1	1	1	7	7	1
GR4	1	1	0	0	1	1	1	1	1	7	7	1
GR5	1	0	0	0	0	1	1	1	1	5	2	4
GR6	1	0	0	0	0	0	1	1	1	4	0	5
GR7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	-4	7
GR8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-6	8
GR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-8	9
$\sum N_i$	5	2	0	0	3	4	6	7	8			

9 žingsnis. Gautų rezultatų pagrindu, yra palyginamos trys ribos (žr. 3.10 lentelę):

1. Racionalioji riba (COPELAND) – daugiatislės selektonovacijos atrinkta vertė (įvertintos sąnaudų atžvilgiu mažiausios projekto išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį periodą). Jei sutampa prioritetai, imama sąnaudų atžvilgiu mažiausioji vertė.

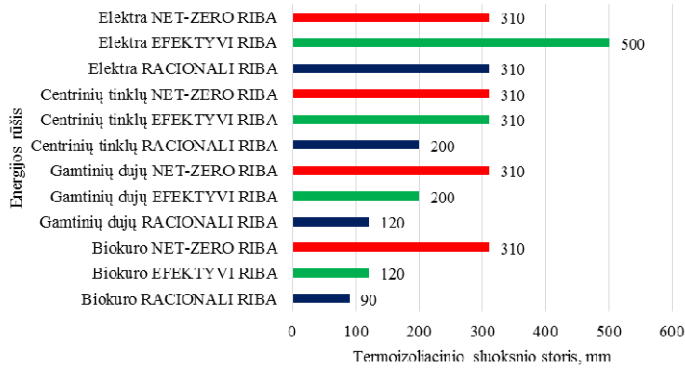
**3.10 lentelė.** Grindų ant grunto *GR-EI* varianto gautų rezultatų lentelė  
**Table 3.10.** The results table of *GR-EI* variant of the ground floor

Eil. Nr.	Atitvarų vertinimas Rodikliai	Biokuras Racionali riba	Biokuras Efektyvi riba	Biokuras Net-zero riba
		Integruotas bendrasis vertinimas	Integruotas bendrasis vertinimas	Integruotas bendrasis vertinimas
1	Energijos kaina, €/kWh	0,019	0,019	0,019
2	Bendrosios išlaidos (GDV) per 30 m. laikotarpį, €/m <sup>2</sup>	20,98	21,68	34,02
3	Energinio naudingumo klasė	C	B*	A++
4	Termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storis, mm	90	120	310
5	Atsipirkimo laikas (lūžio taškas) kai GDV = 0, metais	7,5	9,4	24,6
6	Investavimo pradžios data	2016-05-11	2016-05-11	2016-05-11
7	Pradinių investicijų atsipirkimo data	2023-11-20	2025-10-09	2040-12-10
8	Laikas per kurį skaičiuojami sutaupymai, metais	22,5	20,6	5,4
9	Skaičiuojamasis periodas, metais	30	30	30
10	Atitvaros šilumos perdavimo koeficientas	0,25	0,20	0,10
11	Storio trukūmas (+) arba perteklius (-) lyginant su energijos beveik nevartojančių pastatu, proc.	71	61	0
12	Sąnaudų trukūmas (+) arba perteklius (-) lyginant su energijos beveik nevartojančių pastatu, proc.	38	36	0
13	Laiko trukūmas (+) arba perteklius (-) lyginant su energijos beveik nevartojančių pastatu, proc.	69	62	0

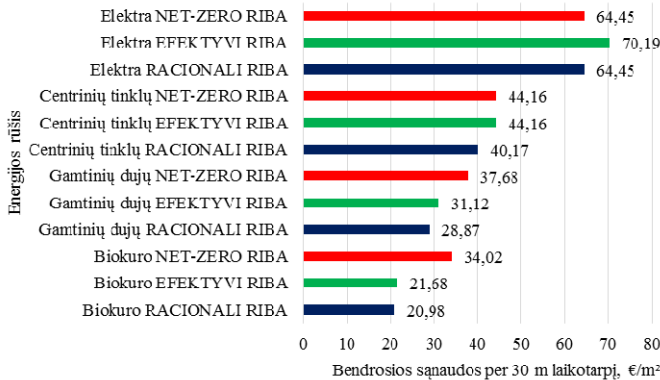
2. Efektyvioji riba (GDV2) – maksimali eksploatavimo efektyvumo vertė (įvertinus išlaidas ir sutaupymus), kai projekto GDV>0.
3. Net-Zero riba - (STR 2.01.09:2012) – nuo 2021 m. energijos beveik nevartojančio pastato A++ energinio naudingumo klasės norminius reikalavimus tenkinanti vertė.

10 žingsnis. Tokiu pat principu yra įvertinami 4 šilumos šaltiniai (*E1* – kietojo kuro katilas naudojantis biokuro energija; *E2* – dujinis katilas naudojantis gamtines dujas; *E3* – centriniai šilumos tinklai, naudojantys mišrų energijos tipą

bei  $E4$  – šildymas elektra). Apskaičiuojami grindų ant grunto efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio storiai (žr. 3.10 pav.), bendrosios sąnaudos (žr. 3.11 pav.) ir pradinių investicijų atsipirkimo laikas (3.12 pav.)

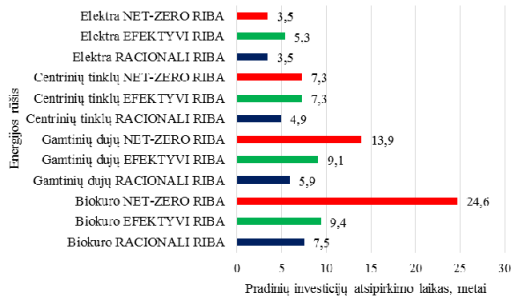


**3.10 pav.** Grindų ant grunto efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storiai  
**Fig. 3.10.** Thermal insulation effective layers (EPS100) of the ground floor

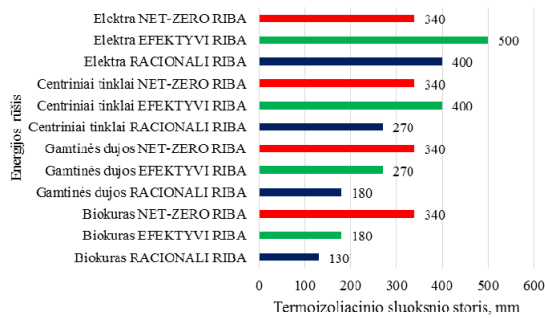


**3.11 pav.** Grindų ant grunto efektyvios bendrosios sąnaudos (GDV)  
**Fig. 3.11.** Effective global cost (NPV) of the ground floor

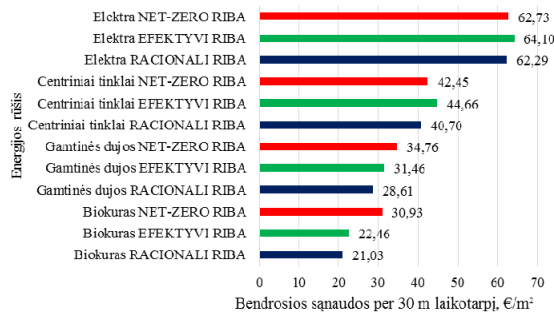




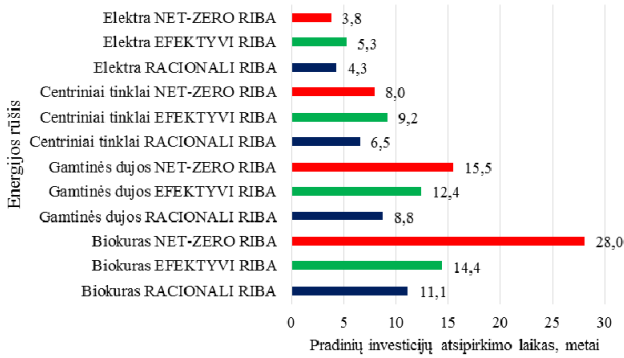
**3.12 pav.** Grindų ant grunto efektyvūs atsipirkimo laikai (GDV=0)  
**Fig. 3.12.** Effective payback time (NPV=0) of the ground floor



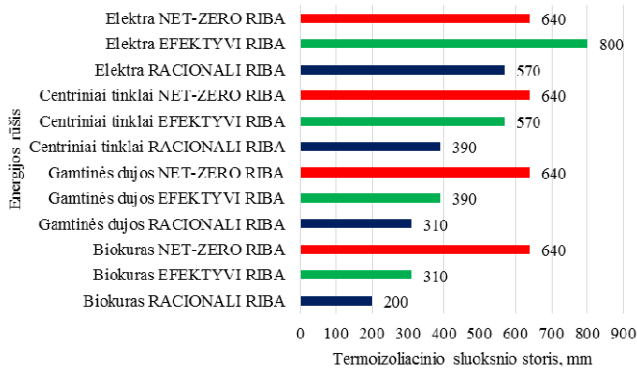
**3.13 pav.** Sienos efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio (EPS70) storiai  
**Fig. 3.13.** Thermal insulation effective layers (EPS70) of the wall



**3.14 pav.** Sienos efektyvios bendrosios sąnaudos (GDV)  
**Fig. 3.14.** Effective global cost (NPV) of the wall



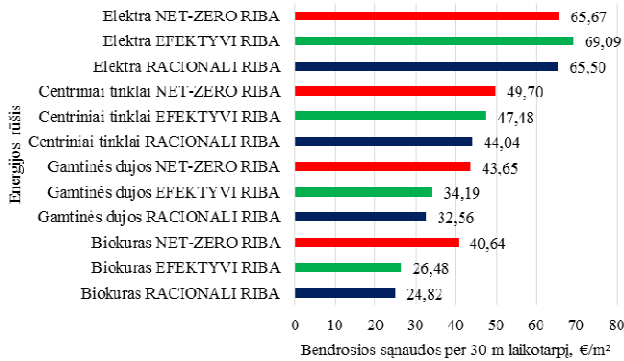
**3.15 pav.** Sienos efektyvūs atsipirkimo laikai (GDV=0)  
**Fig. 3.15.** Effective payback time (NPV=0) of the wall



**3.16 pav.** Stogo efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio (*Paroc Extra*) storiai  
**Fig. 3.16.** Thermal insulation effective layers (*Paroc Extra*) of the roof

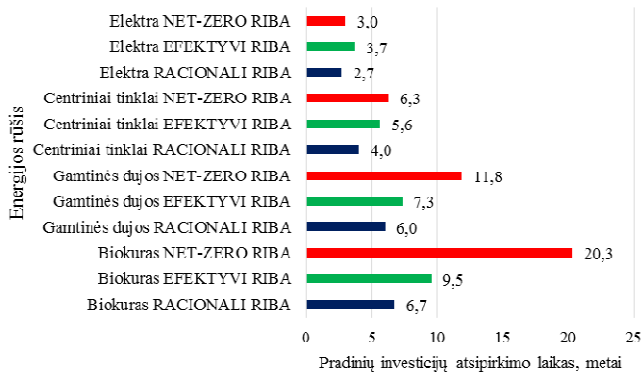
Lygiagrečiai yra apskaičiuojami sienų bei stogo efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio storiai (žr. 3.13 ir 3.16 pav.), bendrosios sąnaudos (žr. 3.14 ir 3.17 pav.) ir atsipirkimo laikas (žr. 3.15 ir 3.18 pav.).

Nustatyta, kad efektyvus termoizoliacinio sluoksnio storis tiesiogiai priklauso nuo energijos šaltinio tipo (storio skirtumai gali siekti iki 71 proc.).



3.17 pav. Stogo efektyvios bendrosios sąnaudos (GDV)

Fig. 3.17. Effective global cost (NPV) of the roof



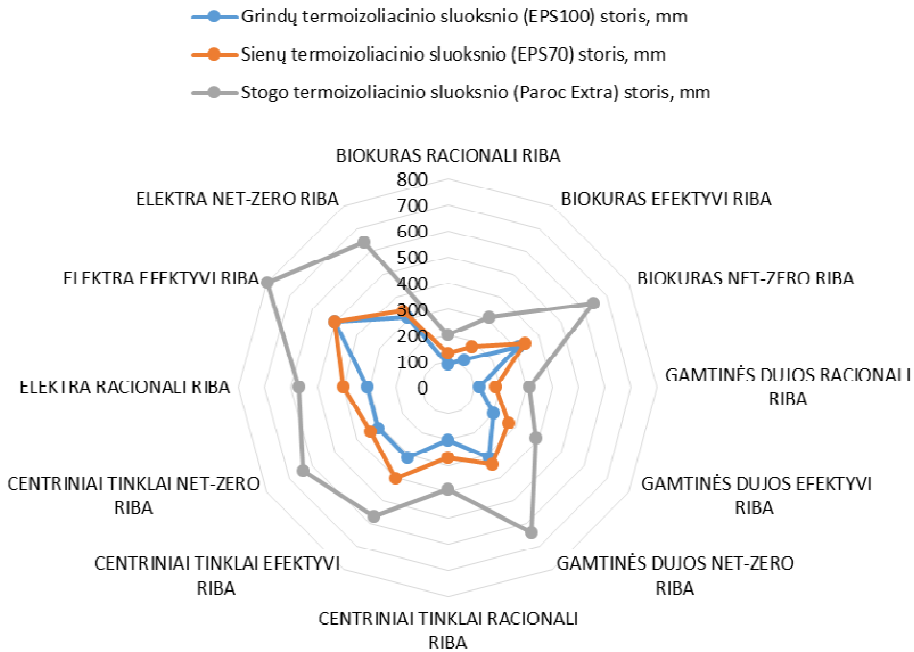
3.18 pav. Stogo efektyvūs atsipirkimo laikai (GDV=0)

Fig. 3.18. Effective payback time (NPV=0) of the roof

Atlikus rezultatų analizę (grindų ant grunto, sienų, stogo atitvarų), nustatyta kad ploniausi efektyvūs atitvarų termoizoliacinio sluoksnio storiai ir bendrosios sąnaudos per 30 metų laikotarpį yra tų alternatyvų, kurių vertinime naudota biokuro energija. Tačiau investavimo požiūriu, lyginant nulinės energijos pastatų reikalavimus, alternatyvos su biokuro energija yra pačios nepalankiausios, nes turi ilgiausią atsipirkimo laiką. Nustatyta, kad ilgiausias atsipirkimo laikas yra sienų apšiltinimui (3.15 pav.). Sienas apšiltinus pagal 2021 metų reikalavimus (Net-Zero riba) ir naudojant biokuro energiją, apšiltinimo atsipirkimo laikas – 28 metai.

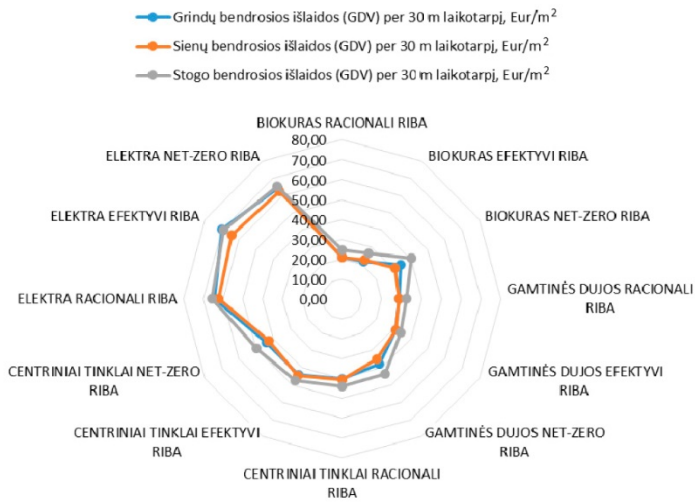
### 3.3. Gautų rezultatų sintezė

Atlikus daugiatislę selektonovaciją, gauti bendrieji tyrimo rezultatai pateikti 3.19–3.22 paveiksluose. Kaip matyti iš šių grafikų efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio storiai, bendrosios sąnaudos ir atsipirkimo laikai tiesiogiai priklauso nuo pastate naudojamo energijos šaltinio tipo. Sąnaudų atžvilgiu ploniausi racionalūs termoizoliaciniai atitvarų sluoksniai reikalingi naudojant biokuro energiją, storiausi – elektros energiją (3.19 pav.).

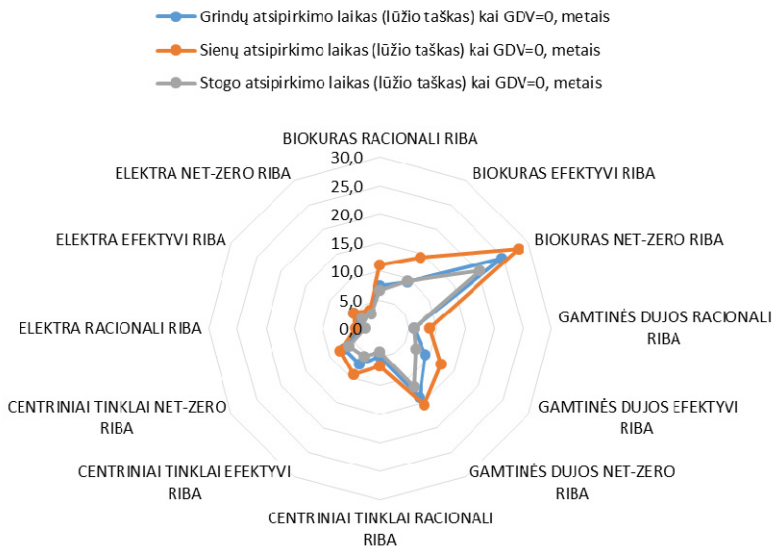


**3.19 pav.** Atitvarų apšiltinimo efektyvūs termoizoliacinio sluoksnio storiai  
**Fig. 3.19.** Thermal insulation effective layers of the building envelopes

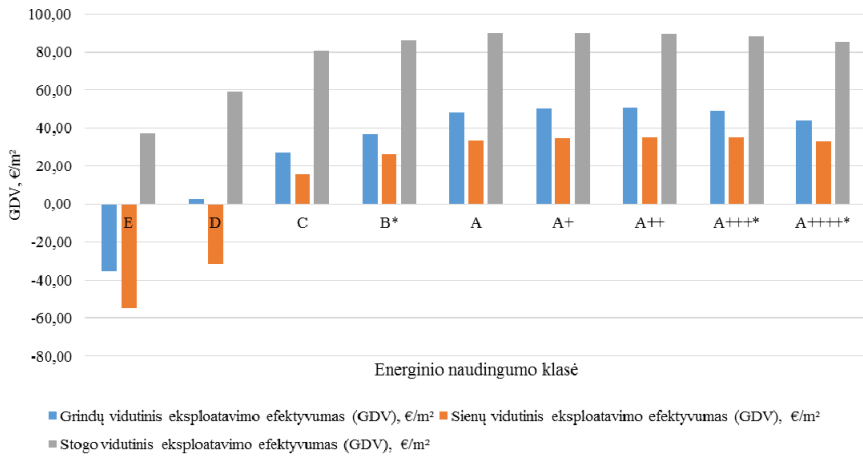
Palyginus atitvarų apšiltinimo bendrąsias sąnaudas su skirtingais energijos šaltiniais, nustatyta, kad mažiausios išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį laikotarpį bus naudojant biokuro energiją (3.20 pav.), tačiau investiciniu požiūriu tai pats nepalankiausias variantas, nes investicijų laikas yra pats didžiausias palyginus su kitomis alternatyvomis ir vos dengia ekonomiškai pagrįstą priemonės skaičiavimo periodą (3.21 pav.). Skaičiuojant atitvarų vidutinį efektyvumą, nustatyta, kad atitvaras šiltinti pagal  $E$  ir  $D$  energinio naudingumo klasių reikalavimus nėra ekonomiškai efektyvu (žr. 3.22 pav.).



**3.20 pav.** Atitvarų apšiltinimo efektyvios bendrosios sąnaudos  
**Fig. 3.20.** Effective global cost of the building envelopes



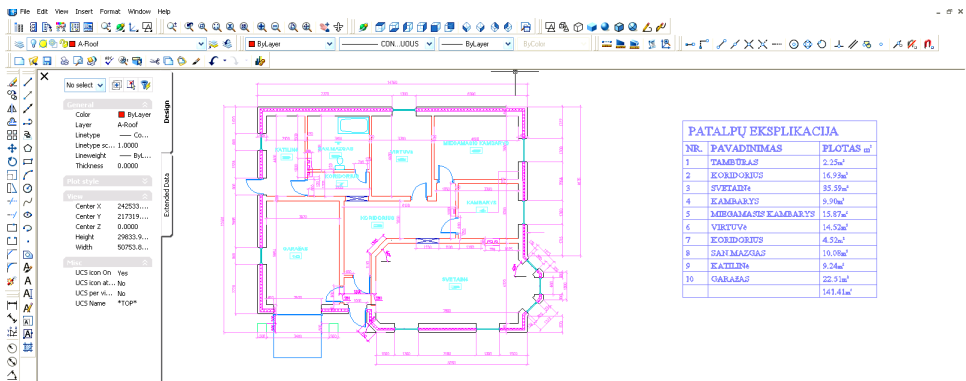
**3.21 pav.** Atitvarų efektyvūs atsipirkimo laikai (GDV = 0)  
**Fig. 3.21.** Effective payback time (NPV = 0) of the building envelopes



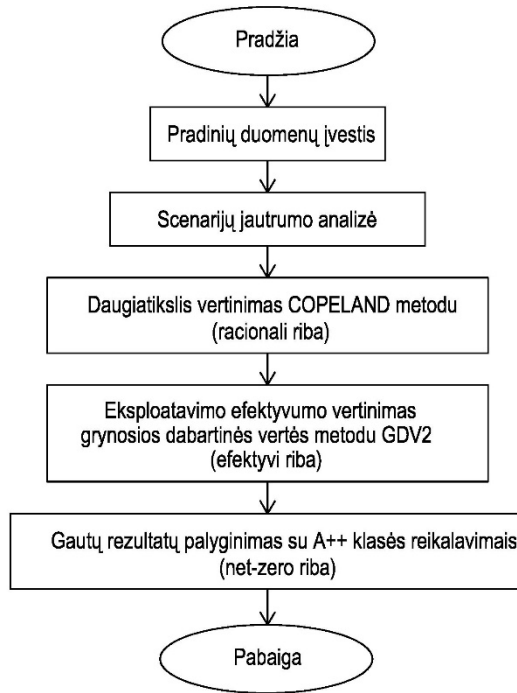
3.22 pav. Atitvarų vidutinis eksploataavimo efektyvumas (GDV)  
Fig. 3.22. Average operational efficiency (NPV) of the building envelopes

### 3.4. Daugiatikslės selektonovacijos modeliavimo programa

Remiantis vienbučio gyvenamojo pastato išorės atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio daugiataikslės atrankos sistema, „Microsoft Excel“ programos pagrindu yra sukurta daugiataikslės selektonovacijos modeliavimo programos TERM-SELECT „beta“ versija. Jos veikimo algoritmas pateiktas 3.24 paveiksle.



3.23 pav. Vienbučio gyvenamojo pastato projektavimas AutoCad aplinkoje  
Fig. 3.23. Single-family residential building design in AutoCAD environment



**3.24 pav.** Daugiatikslės selektonovacijos modeliavimo programos (TERM-SELECT) algoritmas (sudarytas autoriaus)

**Fig. 3.24.** The algorithm of multi-attribute selection simulation program (TERM-SELECT) (author created)

TERM-SELECT programos pagrindu apskaičiuotus duomenis (žr. 3.11, 3.12, 3.13 lentelės) siūloma ateityje integruoti į *AutoCAD* (žr. 3.23 pav.), pastato energinio naudingumo sertifikavimo programas *NRG3* bei kitas sprendimo paramos sistemas (Aviža *et al.* 2015). Sukurto algoritmo pagrindu, gali būti vertinami ir kitos paskirties pastatų termoizoliaciniai sluoksniai, medžiagos bei skirtingi šilumos šaltiniai.

Kaip matyti iš 3.11 lentelės, naudojant biokuro ir gamtinių dujų energiją, grindų ant grunto termoizoliacinio sluoksnio storio racionalumo bei efektyvumo ribos toli nutolusios nuo energijos beveik nevarojančio pastato (2021 metų standartas) ribos. Sąnaudų atžvilgiu A++ energinio naudingumo standartas palankiausias pastatams, vartojantiems centrinių šilumos tinklų bei elektros energiją.

**3.11 lentelė.** Galutiniai grindų (GR) termoizoliacinio sluoksnio tyrimo rezultatai  
**Table 3.11.** The final results of the ground floor thermal insulation layers research data

Energinijos rūšis	Sienų alternatyvos kodas	GR1	GR2	GR3	GR4	GR5	GR6	GR7	GR8	GR9
	Energinio naudingumo klasė	E	D	C	B*	A	A+	A++	A+++*	A++++*
	Termoizoliacinio sluoksnio (EPS100) storis, mm	20	50	90	120	200	250	310	400	500
Biokuras	Racionali riba			x						
	Efektyvi riba				x					
	Net-zero riba							xx		
Gamtinės dujos	Racionali riba				x					
	Efektyvi riba					x				
	Net-zero riba							xx		
Centriniai tinklai	Racionali riba					x				
	Efektyvi riba							x		
	Net-zero riba							xx		
Elektra	Racionali riba							x		
	Efektyvi riba									x
	Net-zero riba							xx		

Lentelės paaiškinimus žiūrėti Bendrose pastabose po 3.13 lentele.



**3.12 lentelė.** Galutiniai sienų (SN) termoizoliacinio sluoksnio tyrimo rezultatai  
**Table 3.12.** The final results of walls (SN) thermal insulation layers research data

Energijos rūšis	Sienų alternatyvos kodas	SN1	SN2	SN3	SN4	SN5	SN6	SN7	SN8	SN9
	Energinio naudingumo klasė	E	D	C	B*	A	A+	A++	A+++*	A++++*
	Termoizoliacinio sluoksnio (EPS70) storis, mm	20	50	130	180	270	300	340	400	500
Biokuras	Racionali riba			x						
	Efektyvi riba				x					
	Net-zero riba							xx		
Gamtinės dujos	Racionali riba				x					
	Efektyvi riba					x				
	Net-zero riba							xx		
Centriniai tinklai	Racionali riba					x				
	Efektyvi riba								x	
	Net-zero riba							xx		
Elektra	Racionali riba								x	
	Efektyvi riba									x
	Net-zero riba							xx		

Lentelės paaiškinimus žiūrėti Bendrose pastabose po 3.13 lentele.

**3.13 lentelė.** Galutiniai stogo (ST) termoizoliacinio sluoksnio tyrimo rezultatai  
**Table 3.13.** The final results of roof (ST) thermal insulation layers research data

Energijos rūšis	Sienų alternatyvos kodas	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9
	Energinio naudingumo klasė	E	D	C	B*	A	A+	A++	A+++*	A++++*
	Termoizoliacinio sluoksnio (Paroc eXtra) storis, mm	150	200	310	390	510	570	640	700	800
Biokuras	Racionali riba		x							
	Efektyvi riba			x						
	Net-zero riba							xx		
Gamtinės dujos	Racionali riba			x						
	Efektyvi riba				x					
	Net-zero riba							xx		
Centriniai tinklai	Racionali riba				x					
	Efektyvi riba						x			
	Net-zero riba							xx		
Elektra	Racionali riba						x			
	Efektyvi riba									x
	Net-zero riba							xx		

Bendros pastabos (3.11–3.13 lentelėms):

- Racionali riba (COPELAND) – daugiatislės selektonovacijos integruoto vertinimo metodu atrinkta vertė (įvertintos sąnaudų atžvilgiu mažiausios projekto išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį periodą).
- Efektyvi riba (GDV2) – maksimali eksploatavimo efektyvumo vertė (įvertinus išlaidas ir sutaupymus), apskaičiuota remiantis grynosios dabartinės vertės metodu, kai projekto  $GDV > 0$ .
- Net-zero riba (STR 2.01.09:2012) – nuo 2021 m. energijos beveik nevartojančio pastato A++ energinio naudingumo klasės norminius reikalavimus tenkinanti vertė (fiksuota xx).

Kaip matyti iš 3.12 lentelės, šiltinti sienų atitvaras pagal A++ energinio naudingumo standartą yra efektyvu tik pastatui naudojant centrinių šilumos tinklų ir elektros energiją. Kitais atvejais, racionalios ir efektyvios yra tik *C*, *B\** ir *A* energinio naudingumo klasės. Tai reiškia, kad projektuoti A++ klasės pastato atitvaras su biokuro ir gamtinių dujų energija, nuo 2021 m. bus ekonomiškai brangesnis variantas, t. y. termoizoliacinio sluoksnio storis ir kaina bus didesni už sąnaudų atžvilgiu mažiausią kainą (racionalumo riba).

Iš visų tirtų atitvarų, stogo atitvarų racionalūs ir efektingi termoizoliacinio sluoksnio storiai labiausiai nutolę nuo A++ standarto reikalavimų, t. y. ekonomiškai racionalu atitvaras šiltinti žymiai plonesniais sluoksniais. Pavyzdžiui, pastatui vartojant biokuro energiją racionalu šiltinti pagal *D* energinio naudingumo klasės reikalavimus, o efektyvi riba tesiekia tik *C* klasę. Žinoma, naudojant elektros energiją, efektyvu šiltinti ir storiu nei reikalauja A++ klasės standartas (3.13 lentelė).

### 3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Disertacijoje siūloma pastato atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio storį pagrįsti autoriaus sukurta atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankos daugiatakslės selektonovacijos sistema. Pristatyta metodika leidžia sujungti mikroekonominio ir makroekonominio vertinimo sudedamąsias dalis į vieną integruoto vertinimo sistemą, o skirtingus tikslus apjungti į bendrą kompleksinį uždavinį.
2. Sprendžiamas praktinis uždavinys ir jo sprendimo algoritmas formuoja naują požiūrį į efektyvų termoizoliacinių sluoksnių parinkimą jau projektavimo ir investicijų planavimo etapuose. Atrinkti metodų deriniai apibendrina daugiatakslio uždavinio sprendimo rezultatus:
  - a) *racionalioji riba (COPELAND)* – daugiatakslės selektonovacijos integruoto vertinimo metodu atrinkta vertė (įvertintos sąnaudų atžvilgiu mažiausios projekto išlaidos per 30 metų skaičiuojamąjį periodą);
  - b) *efektyvioji riba (GDV2)* – maksimali eksploatavimo efektyvumo vertė (įvertinus išlaidas ir sutaupymus), apskaičiuota remiantis grynosios dabartinės vertės metodu, kai projekto  $GDV > 0$ ;
  - c) *Net-Zero riba (STR 2.01.09:2012)* – nuo 2021 m. energijos beveik nevartojančio pastato A++ energinio naudingumo klasės norminius reikalavimus tenkinanti vertė.
3. Pateiktas praktinis pavyzdys rodo, kad siūlomas daugiatakslio vertinimo modelio algoritmas gali būti veiksmingai taikomas atrenkant efektyvius pastato atitvarų termoizoliacinio sluoksnio storius, bendrąsias

sąnaudas, investicijų atsipirkimo laiką bei nustatant investicijų ir eksploataavimo efektyvumą.

4. Gautų rezultatų apjungimas parodė, kad skaičiavimo rezultatai labai jautrūs energijos šilumos šaltinio tipui. Mažiausias racionalus termoizoliacinio sluoksnio storis ir mažiausios bendrosios sąnaudos per 30 metų skaičiavimo laikotarpį yra šilumos šaltiniui, turinčiam kietojo kuro katilą ir naudojančiam biokuro energiją. Tačiau finansiniu požiūriu tai pats nepatraukliausias sprendimas, nes sutaupymai vos padengia pradinių investicijų išlaidas. Energijos beveik nevartojančio pastato (*Net-Zero riba*) reikalavimus atitinkantys apšiltinimo sprendiniai yra 38 proc. brangesni, palyginti su optimalios (mažiausios) kainos (*Racionalioji riba*) sprendiniais. Vertinant vidutinį eksploataavimo efektyvumą (*Efektvyioji riba*) didžiausią įtaką turi stogo apšiltinimo sprendiniai (grynoji dabartinė vertė yra teigiama visoms energinio naudingumo klasėms).
5. Remiantis TERM-SELECT sistema, „Microsoft Excel“ programa yra sukurta daugiatislės selektonovacijos modeliavimo programos „beta“ versija. Iš jos gautus duomenis siūloma ateityje integruoti į kitas sprendimo paramos sistemas. Naudojant sukurta algoritmą gali būti vertinami ir kitos paskirties pastatų termoizoliaciniai sluoksniai, medžiagos ir skirtingi šilumos šaltiniai.

---

## Bendrosios išvados

Sprendžiant disertacijoje identifikuotą mokslinę problemą ir siekiant suformuluoto tikslo bei realizuojant iškeltus uždavinius gauti teorinių ir empirinių tyrimų rezultatai apibendrinti šiose išvadose.

1. Atlikus mokslinę literatūros analizę, išskiriamos šešios pagrindinės koncepcijos energijos beveik nevarojantiems pastatams (NZEB) projektuoti:
  - energijos, aplinkosaugos ir ekonominių priemonių pusiausvyra, todėl NZEB modeliavimo įrankiai turi turėti daugiatakslio vertinimo galimybę;
  - būtina atsižvelgti į klimato faktorius;
  - naudoti pasyvias strategijas (natūralų apšvietimą, vėdinimą, šiluminę inerciją ir apsaugos nuo saulės priemones);
  - NZEB pastatas turi atitikti visus energijos vartojimo efektyvumo standartus, atsižvelgiant į pastato atitvarų racionalų termoizoliacinio sluoksnio storį bei sandarumo reikalavimus;
  - inžinerinės sistemos, naudojančios atsinaujinančius energijos išteklius, yra integrali ir neatskiriama NZEB pastato dalis;
  - suprojektuoti NZEB pastatą – didelis tikslas (iššūkis), todėl tokiam tikslui pasiekti reikalingi novatoriški sprendimai ir technologijos.

- Remiantis išvardytais aspektais siūloma racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankos uždavinius spręsti integruotai ir kompleksiskai.
2. Nustatyta, kad sprendimas yra tinkamai priimtas, jei, atsižvelgiant į priemonės gyvavimo ciklo trukmę, jis atitinka klimato, energinio ir ekonominio naudingumo kriterijus. Tokiems kompleksiniams uždaviniams spręsti siūloma taikyti daugiatakslius sprendimo priėmimo metodus.
  3. Antrajame disertacijos skyriuje pristatytas autoriaus sukurtas daugiatakslio sprendimo priėmimo integruoto modelio algoritmas. Moksliniu požiūriu toks integruotas modelis naudingas tuo, kad suinteresuotas asmuo gali gana greitai rasti racionalų sprendimą bei jį palyginti su kitais variantais.
  4. Energinio efektyvumo ir gyvenimo ciklo analizės principais grindžiamam atrankos modeliui pritaikytas daugiatakslių sprendimo priėmimo metodų kompleksas: SAW metodas + COPRAS metodas + TOPSIS metodas + integruotas COPELAND metodas. Sprendžiant atrankos uždavinius projektavimo ir investicijų planavimo etapuose, siūloma taikyti autoriaus sukurtą daugiatakslio sprendimo priėmimo modelio algoritmą.
  5. Taikant autoriaus sukurtą modelio algoritmą, suformuluotas ir išspręstas vienbučio gyvenamojo pastato išorės atitvarų racionalaus termoizoliacinio sluoksnio atrankos praktinis pavyzdys. Naudojant sukurtą algoritmą gali būti vertinami ir kitos paskirties pastatų termoizoliaciniai sluoksniai, medžiagos ir skirtingi šilumos šaltiniai.
  6. Disertacijoje empiriškai tiriamas vienbučio gyvenamojo pastato atitvarų termoizoliacinio sluoksnio efektyvumas pagal šiuo metu Lietuvos Respublikoje galiojančias norminių dokumentų nuostatas. Uždavinių sprendimo rezultatai yra jautrūs energijos kainų svyravimams. Šiame darbe taikoma vidutinė 2015 m. Lietuvoje naudojamos energijos kaina. Kiekvienais metais ateityje būtina atsižvelgti į tos kainos pokyčius ir naujus energijos brangimo scenarijus. Uždavinio sprendinių patikimumui padidinti tikslinga į uždavinio sprendimo modelį įtraukti papildomus MADM metodus.
  7. Nustatyta, kad efektyvus termoizoliacinio sluoksnio storis tiesiogiai priklauso nuo energijos šaltinio tipo, klimato duomenų (skirtumas iki 22 proc.) ir energijos brangimo scenarijų sistemos.
  8. Siekiant pritaikyti sukurtą modelį spręsti uždavinius kitoje valstybėje ir iš esmės keičiantis energinio naudingumo politikai, būtina atlikti papildomus empirinius tyrimus.

---

## Literatūra ir šaltiniai

Aydogan, E. K. 2011. Performance measurement model for Turkish aviation firms using the rough-AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment, *Expert Systems With Applications* 38: 3992–3998. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.060>

Aggerholm, S. & Grau, K. Bygningers energibehov – Beregningsvejledning (In Danish). SBI-Direction 213, 2. edition. Danish Building Research Institute, Aalborg University. Hørsholm, 2010.

Akadiri, P. O.; Olomolaiye, P. O.; Chinyio, E. A. 2013. Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects, *Automation in Construction* 30: 113–125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>

Amtmann, M, Altmann-Mavaddat, N. 2014: Eine Typologie öster-reichischer Wohngebäude, published by the Austrian Energy Agency, Vienna.

Altwies, J. E.; Nemet, G. F. 2013. Innovation in the US building sector: An assessment of patent citations in building energy control technology, *Energy Policy* 52: 819–831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.050>

Antuchevičienė, J.; Zakarevičius, A.; Zavadskas, E. K. 2011. Measuring Congruence of Ranking Results Applying Particular MCDM Methods, *Informatika* 22(3): 319–338. <http://www.mii.lt/Informatika/pdf/INFO836.pdf>

Attia S.; Gratia E.; A De Herde, JLM Hensen. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and buildings* 49, 2-15.

- Bagočius, V.; Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2013. Multi-Criteria Selection of a Deep-Water Port in Klaipėda, *11th International Scientific Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques (MBMST), MAY 16–17, 2013 Vilnius, Lithuania, Procedia Engineering* 57: 144–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.021>
- Balli, S.; Korukoglu, S. 2009. Operating system selecting using fuzzy AHP and TOPSIS methods, *Mathematical and Computational Applications* 14(2): 119–130.
- Belton, V.; Stewart, T. J. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis: An integrated approach. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands. 372 p.
- Boermans, Bettgenhauser *et al.* 2011. *Cost-optimal building performance requirements – Calculation methodology for reporting on national energy performance requirements on the basis of cost optimality within the framework of the EPBD, ECEEE.*
- Bhattacharyya, S. C. 2012. Energy access programmes and sustainable development: A critical review and analysis, *Energy for Sustainable Development* 16(3): 260–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.05.002>
- Bitarafan, M.; Zolfani, S. Hashemkhani; Arefi, S. L.; Zavadskas, E. K. 2012. Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 12(3): 360–367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2012.06.015>
- Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2006. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy, *Control and Cybernetics* 35(2): 445–469.
- Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2011. MULTIMOORA optimization used to decide on a bank loan to buy property, *Technological and Economic Development of Economy* 17(1): 174–188. <http://dx.doi.org/10.3846/13928619.2011.560632>
- Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2013. Multi-objective economic evaluation of the European Union Member states. As opposed to credit rating agencies opinions? *Transformations in Business & Economics* 12(2): 102–124. <http://www.transformations.khf.vu.lt/29/article/mult>
- Brauers, W. K. M.; Kracka, M.; Zavadskas, E. K. 2012. Lithuanian case study of masonry buildings from the soviet period, *Journal of Civil Engineering and Management* 18(3): 444–456. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.700944>
- Braganca, L.; Mateus, R.; Koukkari, H. 2007. Assessment of building sustainability, *in, Sustainability of Constructions, Integrated Approach to Life-time Structural Engineering, Proceedings of the first COST C25 Workshop*, September 13–15, 2007, Lisbon, Selected papers Multicomp, p. 3–12.
- Bribián, I. Z.; Capilla, A. V.; Usó, A. A. 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, *Building and Environment* 46(5): 1133–1140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>



Buildings Performance Institute Europe ASBL, BPIE survey 2011. [interaktyvus] 2016 [žiūrėta 2016 m. sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.buildingsdata.eu/country-factsheets>.

Buildings Performance Institute Europe (BPIE 2010, 2013). *Implementing the cost-optimal methodology in EU countries*. [interaktyvus] 2016 [žiūrėta 2016 m. sausio 05 d.]. Prieiga per internetą:

[http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Implementing\\_Cost\\_Optimality.pdf](http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Implementing_Cost_Optimality.pdf).

BUILD UP Skills – Lithuania. 2013. [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. sausio 07 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.buildupskills.eu/en/national-project/lithuania>

Chakraborty, S. 2011. Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54(9–12): 1155–2266. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2972-0>

Chatterjee, P.; Athawale, V.M.; Chakraborty, S. 2011. Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods, *Materials & Design* 32(2): 851–860. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.010>

Chen, T. Y. 2012. Comparative analysis of SAW and TOPSIS based on interval-valued fuzzy sets: Discussions on score functions and weight constraints, *Expert Systems with Applications* 39(2): 1848–1861.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.065>

Chou, S. J.; Pham, A. D.; Wang, H. 2013. Bidding strategy to support decision-making by integrating fuzzy AHP and regression-based simulation, *Automation in Construction* 35: 517–527. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.007>

Chu, A. T. W.; Kalaba, R. E.; Spingarn, K. 1979. A Comparison of Two Methods for Determining the Weights of Belonging to Fuzzy Sets, *Journal of Optimization Theory and Applications* 27(4): 531–538.

Copeland, A. H. 1951. A reasonable social welfare function. Seminar on Application of Mathematics to Social Sciences, University of Michigan.

Danish Building Regulations 2010 (BR10) and (BR61). Danish Energy Agency, Copenhagen, 2014.

Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN V 4108-6 – „Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs“; 2003-06, geändert durch Berichtigung 1 2004-03.

Deng S., Wang. R.Z.; Dai I.Y. 2014. How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research, *Energy*, 71: 1–16.

Diefenbach, N., Malottki, Ch., Enseling, A.; Loga, T.; Cischinsky, H.; Stein, B., Hörner, M., Grafe, M. 2013. Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich – Zielerreichungsszenario. Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): BMVBS-Online-Publikation 03/2013.

- Džiugaitė-Tumėnienė, R. 2015. *Mažaenergio vienbučio namo aprūpinimo energija integruotas vertinimas: daktaro disertacija*. Vilnius: Technika, 168 p.
- Enseling, A., Loga, T. 2013. Implementing the cost-optimal methodology in EU countries – Case Study Germany; editor: BPIE, Brussels / Belgium 2013.
- Elkington, J. 1994. Towards the sustainable corporation: Win–win–win business strategies for sustainable development, *California Management Review* 36(2): 90–100.
- EPISCOPE Synthesis Report No. 1, 2014. Published by Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Germany. ISBN 978-3-941140-42-4.
- Europos Parlamento ir Tarybos didektyva 2010/31/ES 2010 m. gegužės 19 d. *dėl pastatų energinio naudingumo*. Briuselis, 2010 m.
- Europos komisija. 2012. Komisijos deleguotasis reglamentas (ES) Nr. 244/2012. Briuselis, 2012 m.
- European Commission. 2012. *Communication from the commission to the European parliament and the council – Strategy for the sustainable competitiveness of the construction sector and its enterprises*, Brussels 31.7.2012COM(2012) 433 final.
- Europos Parlamentas. 2015. *Energijos vartojimo efektyvumas. Balázs Mellár* [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. rugsėjo 20 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/lt/displayFtu.html?ftuId=FTU\\_5.7.3.html](http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/lt/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.7.3.html)
- Fabrizi, K.; Tronchin L.; Tarabusi V. The “cost-optimal levels” of energy performance requirements: rules and case study applications. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, 2013.
- Feist, W. 2003. *Das Passivhaus: Die Optimierung energiebewusster Bauweisen*. VDE Verlag (Germany), 2003.
- Fingerling, A. 1996. *Eine Geschichte der Niedrig-energiehäuser bis zum Passivhaus*; IWU, Darmstadt 1996.
- Glock, Ch. 2013. Integrated Realization of Sustainable and Lifecycle-oriented Real Estates, *Bauingenieur* 88: 105–116.
- Goedert, J. D.; Sekpe, V. D. 2013. Decision Support System–Enhanced Scheduling in Matrix Organizations Using the Analytic Hierarchy Process, *Journal of Construction Engineering and Management* 139(11): 290–297.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000734](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000734)
- Ginevičius, R.; Podvezko, V. 2004. Assessing the Accuracy of Expert Methods, *Engineering Economics* 5(40): 7–12.
- Han, S.; Liu, Z. B.; Li, Y. 2013. *Ambient air quality comprehensive evaluation of matter–element analysis model based on the entropy weights*. Mechanical engineering, materials and energy II Book Series: Applied Mechanics and Materials 281: 653–657.
- Händel, C. 2011. Ventilation with heat recovery is a necessity in “nearly zero” energy buildings, *REHVA Journal* 5: 18–22.

- Holicky M.; Markova J. 2005. Chapter III – reliability differentiation. *Handbook 2: Reliability Backgrounds*, Praha, 2005.
- Hwang, C. L., Yoon, K. 1981. Multiple attribute decision making: Methods and applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 270 p. ISBN 3-540-10558-1.
- International Energy Agency 2016. Technology Roadmap. *Energy efficient building envelopes* 2012 [interaktyvus] [žiūrėta 2016 m. sausio 04 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyEfficientBuildingEnvelopes.pdf>
- Ishizaka, A.; Nemery, P. 2013. Multi-criteria decision analysis: methods and software. Chichester: John Wiley & Sons. 310 p. ISBN 978-1-119-97407-9.
- Yang, J.; Ogunkah, I. C. B. 2013. A Multi-Criteria Decision Support System for the Selection of Low-Cost Green Building Materials and Components, *Journal of Building Construction and Planning Research* 1(4): 89–130. <http://dx.doi.org/10.4236/jbcpr.2013.14013>
- Yu, Y.; Woo, S. J. 2013. A Study on the Model of a Building–Envelope Structural Modification System to Increase Energy Efficiency at the Schematic Design Stage, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 12(2): 189–196. <http://dx.doi.org/10.3130/jaabe.12.189>
- Juan, Y. K.; Gao, P.; Wang, J. 2010. A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement, *Energy and Buildings* 42(3): 290–297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.006>
- Kalibatas, D.; Zavadskas, E. K.; Kalibatiene, D. 2011. The concept of the ideal indoor environment in multi–attribute assessment of dwelling–houses, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 11(1): 89–101.
- Kaynakli, O. 2012. A review. of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 415–425. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>
- Kendall, M. 1970. Rank correlation methods. London: Griffin.
- The Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA). Public Law 110–140, USA [interaktyvus] 2007. [žiūrėta 2016 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.whitehouse.gov/>>.
- Kalibatas, D.; Zavadskas, E. K.; Kalibatiene, D. 2012. A method of multi-attribute assessment using ideal alternative: choosing an apartment with optimal indoor environment, *International Journal of Strategic Property Management* 16(3): 338–353. <http://dx.doi.org/10.3846/1648715X.2012.722567>
- Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Naimavičienė, J.; Krutinis, M.; Plakys, V.; Venskus, D. 2010. Model for a complex analysis of intelligent built environment, *Automation in Construction* 19(3): 326–340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2009.12.006>

Kaklauskas, A.; Kelpšienė, L.; Zavadskas, E. K.; Bardauskienė, D.; Kaklauskas, G.; Urbanas, M.; Sorakas, V. 2011. Crisis management in construction and real estate: conceptual modeling at the micro-, meso- and macro-levels, *Land Use Policy* 28(1): 280–293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.06.008>

Kaklauskas, A.; Rutė, J.; Zavadskas, E. K.; Daniūnas, A.; Pruskus, V.; Bivainis, J.; Gudauskas, R.; Plakys, V. 2012. Passive house model for quantitative and qualitative analyses and its intelligent, *Energy and Buildings* 50: 7–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.008>

Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Raslanas, S.; Ginevicius, R.; Komka, A.; Malinauskas, P. 2006. Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case, *Energy and Buildings* 38: 454–462. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.005>

Kanapeckienė, L.; Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K.; Raslanas, S. 2011. Method and system for multi-attribute market value assessment in analysis of construction and retrofit projects, *Expert Systems with Applications* 38(11): 14196–14207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.232>

Kang, L. S.; Kim, S.-K.; Moon, H. S.; Kim H.S. 2013a. Development of a 4D objectbased system for visualizing the risk information of construction projects, *Automation in Construction* 31: 186–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.038>

Kang, Y.; Kim, C.; Son, H.; Lee, S.; Limsawasd, C. 2013b. Comparison of Preproject Planning for Green and Conventional Buildings, *Journal of Construction Engineering and Management* 139(11): 04013018. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000760](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000760)

Karande, P.; Chakraborty, S. 2012. Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection, *Materials & Design* 37: 317–324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.013>

Karlin, S.; Studden, W. J. 1966. *Tchebycheff Systems: with Applications in Analysis and Statistics*. Interscience Publishers, New York.

Kildienė, S. 2014. Tvarios statybos technologijų plėtros daugiapakopis vertinimas: daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 150 p.

Kildiene, S.; Kaklauskas, A.; Zavadskas, E. K. 2011. COPRAS based comparative analysis of the european country management capabilities within the construction sector in the time of crisis, *Journal of Business Economics and Management* 12(2): 417–434.

Komarovska, A. 2013. Teritorijų planavimo proceso daugiatiškis vertinimas investiciniu aspektu: daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 152 p.

Klimaaktiv Bauen und Sanieren ÖGUT GmbH (2013): klimaaktiv Bauen und Sanieren. Basiskriterien 2013 für Wohngebäude und Dienstleistungsgebäude Neubau/Sanierung. Version 1.0, Juni 2013, Publisher: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

- Kracka, M.; Zavadskas, E. K. 2013. Panel building refurbishment elements effective selection by applying multiple-criteria methods, *International Journal of Strategic Property Management* 17(2): 210–219. <http://dx.doi.org/10.3846/1648715X.2013.808283>
- Kracka, M.; Brauers, W. K. M.; Zavadskas, E. K. 2010. Ranking Heating Losses in a Building by Applying the MULTIMOORA, *Inzinerine Ekonomika – Engineering Economics* 21(4): 352–359.
- Kracka, M.; Zavadskas, E. K. 2013. Panel building refurbishment elements effective selection by applying multiple-criteria methods, *International Journal of Strategic Property Management* 17(2): 210–219. <http://dx.doi.org/10.3846/1648715X.2013.808283>
- Kurnitski, J.; Saari, A.; Kalamees, T.; Vuolle, M.; Niemelä, T. 2011. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation, *Energy and Buildings* 43: 3279–3288. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033>
- Kuzman, M. K.; Grosej, P.; Ayrilmis, N.; Zbašnik–Senegačnik, M. 2013. Comparison of passive house construction types using analytic hierarchy process, *Energy and Buildings* 64: 258–263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.020>
- Kratena, Kurt/ Angela Holzmann, Angela/ Barreto-Gomez, Leonardo/Baumann, Martin/ Bürbaumer, Heimo/Thenius, Gregor/Tretter, Herbert (2013): Bestimmungsgrößen für Energieeffizienz und –verbrauch in Österreichs Haushalten – Eine Komponentenzerlegung.
- Lapinskiene, V.; Martinaitis, V. 2013. The Framework of an Optimization Model for Building Envelope, *11th International Scientific Conference „Modern building materials, structures and techniques“* May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania *Procedia Engineering* 57: 670–677. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.085>
- Lang, G. 2010: 1000 Passivhäuser in Österreich. Passivhaus Objekt-datenbank: Interaktives Dokumentations-Netzwerk Passivhaus.3. Dokumentationsperiode 2006–2009. Wien, Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 85/2010.
- Larichev, O. I.; Kortnev, A. V.; Kochin D. Y. 2002. Decision support system for classification of a finite set of multicriteria alternatives, *Decision Support Systems* 33: 13–21. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9236\(01\)00132-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9236(01)00132-4)
- Lee, Y. H.; Lee, Y. H. 2012. Integrated assessment of competitive–strategy selection with an analytical network process, *Journal of Business Economics and Management* 13(5): 801–831. <http://dx.doi.org/10.3846/16111699.2011.620171>
- Liou, J. J. H.; Tzeng, G. H. 2012. Comments on “Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview”, *Technological and Economic Development of Economy* 18(4): 672–695. <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2012.753489>
- Lietuvos statistikos departamentas [interaktyvus] 2015. [žiūrėta 2015 m. gruodžio 11 d.]. Prieiga per internetą: <db1.stat.gov.lt/statbank>

- Liu, P. 2010. Multi-attribute decision-making method research based on interval vague set and TOPSIS method, *Technological and Economic Development of Economy* 15(3): 453–463. <http://dx.doi.org/10.3846/1392-8619.2009.15.453-463>
- LST EN 1990:2004 *Eurokodas. Konstruktijų projektavimo pagrindai*. Vilnius, 2004 m.
- LST EN 15603:2008 *Energetinės pastatų charakteristikos. Visuminis energijos suvartojimas ir energetinių parametrų apibrėžtis*. Vilnius, 2008 m.
- LST EN 1 5459:2008 „*Energetinės pastatų charakteristikos. Pastatų energetinių sistemų ekonominio įvertinimo procedūra*“. Vilnius, 2008 m.
- LST EN ISO 13370:2008 „*Šiluminės pastatų charakteristikos. Šilumos pernaša gruntu. Skaičiavimo metodai (ISO 13370:2007)*“. Vilnius, 2008 m.
- Marszal, A. J.; Heiselberg, P.; Jensen, R. L.; Nørgaard, J. 2012. On-site or off-site renewable energy supply options? Life cycle cost analysis of Net Zero Energy Building in Denmark, *Renewable Energy* 44: 1–2. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.079>
- MacCrimmon, K. R. 1968. Decision making among multiple-attribute alternatives: A Survey and Consolidated Approach. RAND Memorandum, RM-4823-ARPA.
- Medineckiene, M.; Turskis, Z.; Zavadskas, E. K. 2011. Life-cycle analysis of a sustainable building, applying multi-criteria decision making method, *8th International Conference “Environmental Engineering Location”*, May 19–20, Vilnius, Lithuania, p. 957–961.
- Medineckiene, M.; Bjork, F. 2011. Owner preferences regarding renovation measures – the demonstration of using multi-criteria decision making, *Journal of Civil Engineering and Management* 17(1): 284–295. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2011.582380>
- Mickaityte, A.; Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Tupenaite, L. 2008. The concept model of sustainable buildings refurbishment, *International Journal of Strategic Property Management* 12(1): 53–68. <http://dx.doi.org/10.3846/1648-715X.2008.12.53-68>
- Milutienė, M.; Staniskis, J. K.; Krucius, A.; Augulienė, V.; Ardickas, D. 2012. Increase in buildings sustainability by using renewable materials and energy, *Clean Technologies and Environmental Policy* 14: 1075–1084. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-012-0505-2>
- Loga, T. Stein, B., Diefenbach, N., Born, R. 2014. Deutsche Gebäu-detypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz von ty-pischen Wohngebäuden; second edition, IWU, Darmstadt / Germany, draft version October 2014, previously unreleased.
- OIB – Richtlinie 6. Energieeinsparung und Wärme-schutz. Entwurf: Juni 2014.
- OIB – Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Fest-legung von Zwischenzielen in einem “Nationalen Plan” gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU. 28. March 2014.
- Paroc [interaktyvus] 2016. [žiūrėta 2016 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <[paroc.lt/gaminiai-ir-sprendimai/sprendimai](http://paroc.lt/gaminiai-ir-sprendimai/sprendimai)>.
- Pan, W.; Dainty, A.; Gibb, A. 2012. Establishing and Weighting Decision Criteria for Building System Selection in Housing Construction, *Journal of Construction Engineering and*

- Management* 138(11): 1239–1250. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000543](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000543)
- Podvezko, V. 2011. The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS, *Inžinerine Ekonomika – Engineering Economics* 22(2): 134–146. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.22.2.310>
- Podvezko, V. 2005. Ekspertų įverčių suderinamumas, *Technological and Economic Development of Economy* [Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas] 9(2): 101–107.
- Pogorzelski J.A. 2009. Przewodnik po PN-EN ochrony cieplnej budynków (Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, 392/2009), Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2009.
- Pinter, U.; Pšunder, I. 2013. Evaluating construction project success with use of the MTOPSIS method, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(1): 16–23. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.734849>
- Raju, K. S.; Kumar, D. M. 2013. *Multicriterion analysis in engineering and management*. Kindle edition. PHI Learning Private Limited, 343p.
- Ramanathan, R. 2001. A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment, *Journal of Environmental Management* 63: 27–35. <http://dx.doi.org/10.1006/jema.2001.0455>
- Rasiulis R., Ustinovičius L., Vilutienė T., Popov Vladimir. 2016. Decision model for selection of modernization measures: public building case. *Journal of Civil Engineering and Management* 22:11, 124–133. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2015.1117018>
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej. Dz. U. z 2015 r. poz. 376.
- RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“. Vilnius, 1994.
- Saaty, T. L.; Vargas, L. G.; Kearns, K. P. 1991. *The Logic of Priorities: Analytical Planning – The Organization of Systems*, RWS Publications, p. 509.
- Saaty, T. L. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw–Hill.
- Saaty, T. L. 1996. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T. L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology* 15(3): 234–281.
- Saaty, T. L., Ergu D. 2015. When is a Decision-Making Method Trustworthy? Criteria for Evaluating Multi-Criteria Decision-Making Methods, *International Journal of Information Technology & Decision Making* 14(06): 1171–1187.
- Sala, S.; Farioli, F.; Zamagni, A. 2013. Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2), *International Journal of Life Cycle Assessment* 18(9): 1686–1697. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0509-5>

- Saparauskas, J.; Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2011. Selection of facade's alternatives of commercial and public buildings based on multiple criteria, *International Journal of Strategic Property Management* 15(2): 189–203.  
<http://dx.doi.org/10.3846/1648715X.2011.586532>
- SBi (ed.) (2014): BYGNINGSTYPOLOGIER. Vol. 2014.
- Simanavičienė, R. 2011. Kiekybinių daugiataikslių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė: daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 148 p.
- Simanavičienė, R. 2013. Statistinių metodų taikymas daugiataikslių sprendimų patikimumui įvertinti, *Informacijos mokslai* 65: 120–126.
- Staniunas, M.; Medineckiene, M.; Zavadskas, E. K.; Kalibatas, D. 2013. To modernize or not: Ecological-economical assessment of multi-dwelling houses modernization, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13(1): 88–98.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2012.11.003>
- Stankevičius, V.; Dapkus, G.; Burlingis, A. 1997. *Pastatų atitvarų apšiltinimo atsiperkamusas*. Kaunas: ASI. 19 p.
- STR 2.01.03:2009 „Statybinių medžiagų ir gaminių šiluminių techninių dydžių projektinės vertės“. Vilnius, 2009.
- STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“. Vilnius, 2012.
- STR 2.05.01:2013 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas“. Vilnius, 2013.
- STR 2.05.02:2008 „Statinių konstrukcijos. Stogai“. Vilnius, 2008.
- ST 124555837.01:2005 „Atitvarų šiltinimas polistireniniu putplasčiu“. Vilnius, 2005.
- ST 2124555837.01:2013 „Atitvarų šiltinimas polistireniniu putplasčiu“. Vilnius, 2013.
- Šaparauskas, J. 2004. Darnaus miesto vystymo(-si) daugiataikslė selektonovacija: daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 143 p.
- Taylan, O.; Bafail, A. O.; Abdulaal, R. M. S.; Kabli, M. R. 2014. Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies, *Applied Soft Computing* 17: 105–116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.003>
- Tamosaitienė, J.; Gaudutis, E. 2013. Complex assessment of structural systems used for high-rise buildings, *Journal of Civil Engineering and Management* 19(2): 305–317.  
<http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.772071>
- Tamošaitienė, J.; Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2013. Multi-criteria risk assessment of a construction project, *Procedia Computer Science : first international conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2013)*, 16-18 May, 2013, China, 17: 129–133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.018>



- Tomaševič, V. 2010. Investicinių projektų ekonominio efektyvumo analizė ir vertinimas (taikant diskontuotų pinigų srautų metodus): daktaro disertacija. Vilniaus universitetas, 212 p.
- Tao, R.; Tam, C. M. 2013. System reliability theory based multiple-objective optimization model for construction projects, *Automation in Construction* 31: 54–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.040>
- Triantaphyllou, E. 2000. Multi-criteria decision making methods a comparative study. Boston: Kluwer Academic Publishers. 320 p.
- Tupenaite, L.; Zavadskas, E.K.; Kaklauskas, A.; Turskis, Z.; Seniut, M. 2010. Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation, *Journal of Civil Engineering and Management* 16(2): 257–266. <http://dx.doi.org/10.3846/jcem.2010.30>
- Turskis, Z. 2008. Multi-attribute contractors ranking method by applying ordering of feasible alternatives of solutions in terms of preferability technique, *Technological and Economic Development of Economy* 14(2): 224–239. <http://dx.doi.org/10.3846/1392-8619.2008.14.224-239>
- Turskis, Z. 2009. *Daugiatikslio apsisprendimo metodai statinių gyvavimo ciklui modeliuoti*, habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga, Vilnius technika, 41 p.
- Ustinovičius, L.; Jakučionis, S. 2000. Daugiakriterinių metodų taikymas vertinant senamesčio pastatų renovacijos investicinius projektus. *Statyba*. VI tomas, Nr. 4. Vilnius: Technika, p. 227–237.
- Ustinovičius, L.; Ambrasas, G.; Alchimovienė, J.; Ignatavičius, Č.; Vilutienė, T. 2012. *Statinių eksploatavimas ir atnaujinimas*. Mokomoji knyga. Technika, Vilnius, 231 p.
- Ustinovičius, L.; Zavadskas, E. K. 2004. Statybos investicijų efektyvumo sistemotechninis įvertinimas. Vilnius: Technika. 220 p. ISBN 9986-05-806-6.
- Ustinovichius, L. 2007. Methods of determining objective, subjective and integrated weights of attributes, *International journal of management and decision making* 8(5/6): 540–554.
- Ustinovichius, L.; Zavadskas, E. K.; Podvezko, V. 2007b. The Application of a quantitative multiple criteria decision making (MCDM-1) approach to the analysis of investments in construction, *Control and cybernetics* 36 (1): 251–268.
- Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. *Vidutinė šalies kuro (žaliavos) kaina 2015*. [interaktyvus] 2016 [žiūrėta 2016 m. sausio 05 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx>.
- Volvaciovas, R.; Turskis, Z.; Aviza, D.; Mikšienė, R. 2013. Multi-attribute Selection of Public Buildings Retrofits Strategy, *11th International Scientific Conference „Modern building materials, structures and techniques“*, May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania, *Procedia Engineering* 57: 1236–1241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.156>

Volvačiovas, R. 2014. Visuomeninės paskirties pastatų atnaujinimo efektyvumo tyrimas ir daugiatis vertinimas: daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 172 p.

Wang, F.; Cui, T. 2013. The Comprehensive Safety Evaluation Method on the Safety Situation of Iron Mine based on AHP and Extension Theory, *Sustainable Development of Natural Resources* 616–618: 208–212.

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.208>

Zavadskas, E. K.; Vaigauskas, E. 1985. *Method applying of decision making theory when preparing construction* (Sprendimų priėmimo teorijos metodų taikymas ruošiant statybą). Vilnius: Technika.

Zavadskas, E. K. 1987. Resursų taupymo sprendimų statyboje kompleksinis įvertinimas ir parinkimas (rusų k.) Vilnius, 212 p.

Zavadskas, E. K. 1991. Системотехническая оценка технологических решений (Systems of estimation of technological solutions in building construction). Ленинград: Стройиздат (*in Russian*).

Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. 1996. Pastatų sistemotechninis įvertinimas. Vilnius: Technika, 280 p.

Zavadskas, E. K.; Simanauskas, L.; Kaklauskas, A. 1998. Sprendimų paramos sistemos statyboje. Vilnius: Technika. 235 p.

Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., Banaitienė, N. 2001. *Pastato gyvavimo proceso daugiakriterinė analizė*. Vilnius: Technika, p. 379.

Zavadskas, E. K.; Zakarevicius, A.; Antucheviciene, J. 2006. Evaluation of ranking accuracy in multi-criteria decisions, *Informatica* 17(4): 601–618.

Zavadskas, E. K.; Raslanas, S.; Kaklauskas, A. 2008. The selection of effective retrofit scenarios for panel houses in urban neighborhoods based on expected energy savings and increase in market value: The Vilnius case, *Energy and Buildings* 40: 573–587. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.015>

Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A.; Turskis, Z.; Tamosaitiene, J. 2009. Multi-Attribute Decision-Making Model by Applying Grey Numbers, *Informatica* 20(2): 305–320.

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Tamosaitiene, J. 2010a. Risk Assessment of Construction Projects, *Journal of Civil Engineering and Management* 16(1): 33–46.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.003>

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Tamosaitiene, J. 2010b. Multi-criteria decision making of management effectiveness of construction enterprises based on the SWOT and MCDM, *6th International Scientific Conference Business and Management*, May 13–14, 2010, Vilnius, Lithuania, p. 1127–1132. <http://dx.doi.org/10.3846/bm.2010.152>

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Ustinovichius, L.; Shevchenko, G. 2010b. Attributes Weights Determining Peculiarities in Multiple Attribute Decision Making Methods, *Inžinerine Ekonomika – Engineering Economics* 21(1): 32–43.

- Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2011. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in Economics: an overview, *Technological and Economic Development of Economy* 17(2): 397–427. <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>
- Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Tamosaitiene J. 2011. Selection of construction enterprises management strategy based on the SWOT and multi-criteria analysis, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 11(4): 1063–1082. <http://dx.doi.org/10.3846/bm.2010.152>
- Zavadskas, E. K.; Vainiūnas, P.; Turskis, Z.; Tamosaitiene J. 2012a. Multiple criteria decision support system for assessment of projects managers in construction, *International Journal of Information Technology & Decision Making* 11(2): 501–520. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219622012400135>
- Zavadskas, E. K.; Susinskas, S.; Daniunas, A.; Turskis, Z.; Sivilevičius, H. 2012b. Multiple criteria selection of pile-column construction technology, *Journal of Civil Engineering and Management* 18(6): 834–842. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.744537>
- Zavadskas, E. K.; Antucheviciene, J.; Saparauskas, J.; Turskis, Z. 2013. Multi-criteria Assessment of Facades' Alternatives: Peculiarities of Ranking Methodology, *11th International Scientific Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques (MBMST)* May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania, *Procedia Engineering* 57: 107–112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.016>
- Zirngibl, J. 2014. Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) in the CEN draft standard; *REHVA Journal* – May 2014.
- Zolfani, S. H.; Zavadskas, E. K. 2013. Sustainable Development of Rural Areas' Building Structures Based on Local Climate, *11th International Scientific Conference „Modern building materials, structures and techniques“* May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania, *Procedia Engineering* 57: 1295–1301. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.163>
- Xiangfei Kong; Lu, S.; Wu, Y. 2012. A review of building energy efficiency in China during „Eleven Five-Year Plan” period, *Energy policy* 41: 624–635. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.024>



---

# Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

## **Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose**

Aviža, D.; Turskis Z. 2014. An empirical analysis of correlation of floor's thermal isolation layer thickness with time of payback. *Journal of Civil Engineering and Management* 20(5): 760–766. Thomson Reuters Web of Knowledge (*ISI Web of Science*), IF<sub>2012</sub>=2,016.

Aviža D.; Turskis Z., Kaklauskas A. 2015a. A Multiple criteria decision support system for analyzing the correlation between the thickness of a thermo-insulation layer and its payback period of the external wall. *Journal of Civil Engineering and Management* 20(6): 827–835. Thomson Reuters Web of Knowledge (*ISI Web of Science*), IF<sub>2012</sub>=2,016.

Aviža D.; Turskis, Z.; Święcicki A. 2015b. An empirical analysis of the Lithuanian and Polish normative requirements and their influence on the payback of a thermo-insulation layer of an external wall detail. *Technical Transactions. Civil Engineering* 3–B(13):3–10.

## **Straipsniai kituose leidiniuose**

Aviža, D.; Turskis, Z.; Volvačiovas, R. 2013a. Correlation analysis of thermo-insulation layer thickness and its payback period of the typical pitched roof detail. *Procedia Engine-*

ering. *11th international conference on modern building materials, structures and techniques (MBMST)*, May 16-17, 2013, Vilnius, Lithuania. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2013. ISSN 1877-7058. Vol. 57 (2013), p. 120–126.

Volvačiovas, R.; Turskis, Z.; Aviža, D.; Mikštienė, R. 2013b. Multi-attribute selection of public buildings retrofits strategy, *Procedia Engineering. 11th international conference on modern building materials, structures and techniques (MBMST)*, May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2013. ISSN 1877-7058. 2013, Vol. 57, p. 1236–1241.

Aviža, D.; Kaupienė, J.; Baltušnikienė, R. 2015c. An empirical analysis of straw house heat loss, *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'2015*: proceedings of 10th international conference, May 21-22, 2015, Panevezys, Lithuania / Kaunas university of technology, KTU Panevezys Faculty of technologies and business, Military university of technology, Intelligent transport systems, Tallinn university of technology, Riga technical university. Kaunas: Technologija, 2015. ISSN 2345-0088. p. 35–39.

Balčienė, R.; Garuckas, D.; Aviža, D. 2015d. An empirical study of internal engineering system efficient installation, *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'2015*: proceedings of 10th international conference, May 21–22, 2015, Panevezys, Lithuania / Kaunas university of technology, KTU Panevezys Faculty of technologies and business, Military university of technology, Intelligent transport systems, Tallinn university of technology, Riga technical university. Kaunas: Technologija, 2015. ISSN 2345-0088. p. 43–46.

Bernotas, K.; Aviža, D. 2015e. External wall efficient insulation selection using a SAW method, *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'2015*: proceedings of 10th international conference, May 21–22, 2015, Panevezys, Lithuania / Kaunas university of technology, KTU Panevezys Faculty of technologies and business, Military university of technology, Intelligent transport systems, Tallinn university of technology, Riga technical university. Kaunas: Technologija, 2015. ISSN 2345-0088. p. 65–68.

Fiodorovas, A.; Bazaras, Z.; Aviža, D. 2015f. A plus plus energy efficiency class buildings roof insulation decisions determination with TOPSIS method, *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'2015*: proceedings of 10th international conference, May 21–22, 2015, Panevezys, Lithuania / Kaunas university of technology, KTU Panevezys Faculty of technologies and business, Military university of technology, Intelligent transport systems, Tallinn university of technology, Riga technical university. Kaunas: Technologija, 2015. ISSN 2345-0088. p. 43–46.

Tamoševičius A.; Bazaras, Z.; Aviža, D. 2015g. Selection of an effective A plus plus energy efficiency class solution for exterior walls of buildings using the TOPSIS method,

*Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'2015*: proceedings of 10th international conference, May 21–22, 2015, Panevezys, Lithuania / Kaunas university of technology, KTU Panevezys Faculty of technologies and business, Military university of technology, Intelligent transport systems, Tallinn university of technology, Riga technical university. Kaunas: Technologija, 2015. ISSN 2345-0088. p. 43–46.

Šleivienė, S.; Sušinskas, S. Aviža, D. 2015h. Renewable energy applications in residential buildings empirical study, *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'2015* : proceedings of 10th international conference, May 21–22, 2015, Panevezys, Lithuania / Kaunas university of technology, KTU Panevezys Faculty of technologies and business, Military university of technology, Intelligent transport systems, Tallinn university of technology, Riga technical university. Kaunas: Technologija, 2015. ISSN 2345-0088. p. 229–232.

Aviža, D.; Turskis, Z.; Zavadskas, E. K. 2012. Vienbučio gyvenamojo pastato grindų ant grunto tipinės detalės termoizoliacinio sluoksnio storio koreliacinė analizė, *15-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos „Statyba“ 2012 m. kovo 22–24 d. straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 2012. ISSN 2029-7149, ISBN 9786094572159. p. 1–6.





---

# Summary in English

## Introduction

### Formulation of the problem

Significant energy savings may be achieved in the sector of residential and non-residential buildings when the optimal insulation thickness is designed for the buildings or the buildings are renovated effectively. In this field energy consumption is equal to approximately 40% (Kaynakli *et al.* 2012). Discussion regarding this problem is going on the international level as well. USA has approved energy efficiency declaration “The Energy Independence and Security Act of 2007” which plans to reduce energy use in the sector of buildings till the year 2030, and to complete implementation of the reform till the year 2050 (Marszal *et al.* 2012; etc.).

The use and management of energy is relevant to Asia region as well because of environmental and financial reasons. China aims to improve energy efficiency by 20% during the period of 5 years (Xiangfei *et al.* 2012; etc.).

Lithuania also aims to improve energy efficiency in building sector. In order to attain the objectives, i.e. to ensure a smooth transition from minimum energy performance requirements to “A++” class, it is important to assess rationally optimal method of envelopes' insulation and an influence of total return on making the final decisions.

This thesis analyses the selection system of optimal thermal insulation layer for building envelopes (walls, roof and floor on ground level), which is based on the principles of *energy* and *economic* efficiency.

The problem is that according to the valid in Lithuania normative documents for energy efficiency the envelopes are assessed only according to the heat transmission coefficient, and the life cycle of envelopes, rational price, forms of energy, source of heat, climate zones remain unconsidered. Lithuania is assessed as one climatic region, in which the average temperature of outdoor air during the heating season is equal to 0.6 °C. In the different climatic zones of Lithuania outdoor air is different, various heat sources are being used to heat the buildings, therefore in this paper this fact is investigated in greater detail, and the more accurate system to assess the selection of optimal thermal insulation layer is presented.

### **Relevance of the thesis**

From 31 December 2020 European Union Member States according to the requirements of European directive 2010/31/EU will have to ensure that all new buildings will be nearly zero-energy buildings. 4 year period is intended for this aim (Marszal *et al.* 2012; etc.).

According to the valid in Lithuania normative requirements and the provisions of Lithuanian Building Technical Regulation STR 2.01.09:2012 “Energy performance of buildings – Certification of energy performance of buildings” the buildings are grouped in 9 classes of energy performance: A++, A+, A, B, C, D, E, F, G (the G Class means that the buildings are ineffective, use much energy).

Traditional new and renovated buildings in Lithuania are built and designed according to the provisions of Building Technical Regulation STR 2.01.09:2012, therefore most often only the minimal technical requirements are met, and life cycle of envelopes, global costs, optimal price of decision remain unconsidered.

Big challenge for Lithuania and Europe is to design and built nearly zero-energy buildings effectively (to reach “A++” Class). One can't found many cases of analysis of foreign scientists related to this subject. Therefore research in this field is both necessary and timely and this is emphasised in the articles (Kurnitski *et al.* 2011; etc.).

### **Object of the research**

Optimal thermal insulation layer for building envelopes, the creation of multi-attribute assessment system according to the principles of optimal price and energy performance.

### **Aim of the thesis**

To propose multi-purpose selectonovation integrated model for establishing of optimal thermal insulation layer for building envelopes and to present its practical application algorithm.

### **Objectives of the thesis**

The aim of the thesis is reached by solving these objectives:

1. To analyse scientific literature regarding the European Union and Lithuanian legal framework related with building energy performance and optimal pricing in the context of low-energy buildings design.
2. To investigate possibilities to apply the multi-attribute decision making methods in order to solve complex tasks.

3. To create the multi-purpose selectonovation theoretical assesment model of optimal thermal insulation layer for building envelopes based on principles of energy performance and optimal price in the light of the type of envelopes, data on Lithuanian climate, various energy sources.
4. To create scenarios system for the integrated micro- and macroeconomical assesment which would help to calculate cost-optimal levels of energy performance requirements.
5. To analyse energy performance influence on the operational efficiency and to propose system of criteria in order to create complex of multi-attribute decision making methods.
6. To apply practically integrated multi-purpose selectonovation model algorithm to detached single-family residential building.
7. To compare obtained results with requirements for nearly zero-energy building.

### **Methodology of the research**

The preparation of this paper is based on the foreign and Lithuanian researchers' publications, investigations, Certification of energy of performance of building. In order to create a system of criteria various information sources of institutions were used. In order to substantiate practical application of multi-attribute integrated decision making model algorithm multi-attribute decision making methods were used (SAW, COPRAS, TOPSIS), as well as expert assessment, COPELAND method for summarizing of results, modelling of scenarios, comparison of obtained calculation results and synthesis.

### **Scientific novelty of the thesis**

In course of development of this thesis the following new results for Civil Engineering were obtained:

1. System of criteria was created for the selection of best decision, in which the thickness of thermal insulation for envelopes, energy performance classes, global costs, payback period, and criteria of credibility of the measures were determined.
2. Theoretical multi-purpose selectonovation model based on principles of energy performance and optimal price was created for assesment of thermal insulation layer of building envelopes.
3. Integrated micro- and macroeconomical criteria system for assesment of scenarios was created in order to calculate cost-optimal levels of energy performance requirements.
4. Effective complex of multi-attribute decision making methods was proposed: SAW method + COPRAS method + TOPSIS method + integrated COPELAND method.
5. Model of results comparison was created which allows to compare the thickness of effective thermal insulation layer from various points of view: according to the range of energy performance classes, various energy sources, climatic data,

rationality and efficiency limits. The obtained results were compared with the requirements for nearly zero-energy building.

6. The practical implementation of multi-purpose selection of detached residential building envelopes optimal thermal insulation layer was presented based on the theoretical multi-attribute assessment model.

### **Practical value of the research findings**

The results of investigations may be useful to designing companies, audit companies and construction companies. Multi-attribute assessment algorithm was proposed, selection simulation program was created to assess effective thickness of thermal insulation layer of building envelopes, global costs, and payback periods. More effective using of thermal insulation products and investments may be promoted after practical application of proposed multi-purpose selection model.

### **Defended statements**

1. Multi-purpose selection integrated decision making assessment is one of possible effective methods to ascertain optimal thermal insulation layer for building envelopes, global costs and payback period, taking into account the type of energy source, economic assessment scenarios and climatic data.
2. Decision making system based on multi-attribute methods may be used effectively to assess the effectiveness of envelopes heating or to solve task with big quantity of data and when the search for best decision is based on many purposes.
3. Proposed integrated model allows to create decision support systems which assess optimal heating option during the design and investment planning phases.

### **Approval of the research findings**

Twelve research articles were published on the subject of this thesis, two of them were included in the list of *Thomson Reuters Web of Knowledge (ISI Web of Science)*, eight articles were presented in the conference *ISI Proceedings (Aviža et al. 2014, 2015)*; one – in the edition of the other international database; one – in the set of articles of Lithuanian conferences.

The results of investigations from the thesis were published in four scientific conferences (three of them were international and one of them in the young researchers conference of Lithuania):

- 11th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, 2013, Vilnius;
- 15th “Science – Future of Lithuania” Conference for young scientists, 2012, Vilnius.

- International Conference “Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (INTEMS'2015)”, 2015, Panevėžys;
- International Conference INBUILD'2015, Krakow.

### **Structure of the thesis**

The thesis consists of the following parts: Introduction, Chapters 1–3, General Conclusions, References, the List of author's research publications on the subject of the thesis, and Annexes.

Volume of thesis with Abstract in English – 135 pages (without Annexes), 60 numbered Equations were used in the text, 64 Figures and 47 Tables. 167 sources of literature were cited in the paper.

## **1. Building Energy Performance and Optimal Costs: Scientific and Regulatory Approach**

From 31 December 2020 European Union Member States according to the requirements of European directive 2010/31/EU will have to ensure that all new buildings will be nearly zero-energy buildings. 4 year period is intended for this aim (Marszal *et al.* 2012; etc.).

The most scientific investigations are implemented in Europe with nearly zero-energy buildings. The concepts of *zero-emission* or *carbon neutral building* are found in scientific literature as well.

It was also found that according to the requirements of European directive 2010/31/ES the cost-optimal framework methodology is based on the net present value (global costs) methodology (Fabri *et al.* 2013).

Lithuania aims to improve energy performance in building sector as well. In order to achieve desired goals, i.e. to ensure a smooth transition from minimum energy performance requirements to the requirements for nearly zero-energy buildings (NZEB) of “A++” class (Fig. 1), it is important to assess rationally an influence of climate parameters and cost-effectiveness on the final decision making.

Only the requirements of energy performance for detached residential building envelopes (roof, walls and floor on ground level) are assessed in this paper, assuming that the other building energy performance indicators are fixed (that they are stable and suitable to assess all energy performance classes for building envelopes).

It is not possible to solve complex tasks using one-criteria assessment methods (Ustinovičius 2007) therefore at time of rapid progress of management methods and computers, multicriterial decision making methods are used more often to solve the complex tasks of Civil Engineering and investment calculation.

## **2. Multi-purpose selection Model for Choosing the Building Envelopes' Optimal Thermal Insulation Layer**

Multi-attribute decision making – one of ways to make decision, which is being used in order to find rational solution (alternative). The aim of multi-attribute decision making methods is to find the best possible solution which would meet the desired purposes and limits of decision maker.

In order to estimate the best alternatives of thickness of thermal insulation layer for building envelopes (walls, roof and floor on ground level), the author has created theoretical multi-purpose selection model algorithm (see Fig. S1).

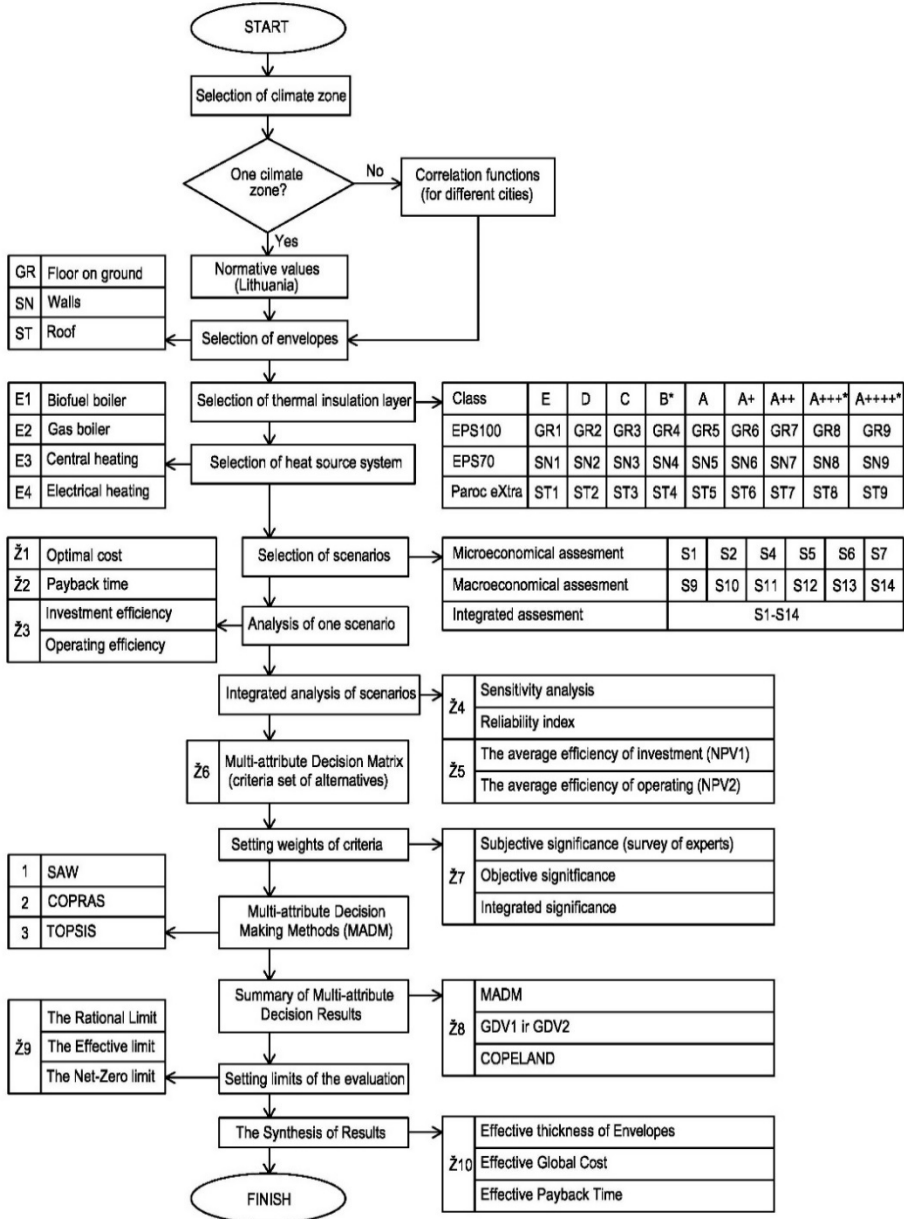


Fig. S1. Algorithm of integration decision making model (created by the author)

The process of multi-attribute decision making has 13 main phases:

*Phase 1.* Selection of climate zone.

*Phase 2.* Selection of envelopes.

*Phase 3.* Selection of thermal insulation layer.

*Phase 4.* Selection of heat source.

*Phase 5.* Selection of economic scenarios.

*Phase 6.* Analysis of one scenario.

*Phase 7.* Integrated analysis of scenarios.

*Phase 8.* Matrix of multi-attribute assessment original data is made to estimate alternative priorities row.

*Phase 9.* Estimation of weight of criteria.

*Phase 10.* Analysis of multi-attribute decision making methods (SAW, COPRAS, TOPSIS) complex and rating of alternatives.

*Phase 11.* Comparison of obtained by different methods results using methods COPELAND and VIDURKIS.

*Phase 12.* Estimation of assessed limits: 1) *rational limit* (COPELAND) – multi-attribute project cost during estimated period of 30 years); *effective limit* (GDV2) – maximum value of operational efficiency (after assessing the costs and savings), when project  $GDV > 0$ ; 3) *net-zero limit* (STR 2.01.09:2012) – value which meets the normative requirements of nearly zero-energy building A++ energy performance class from the year 2021.

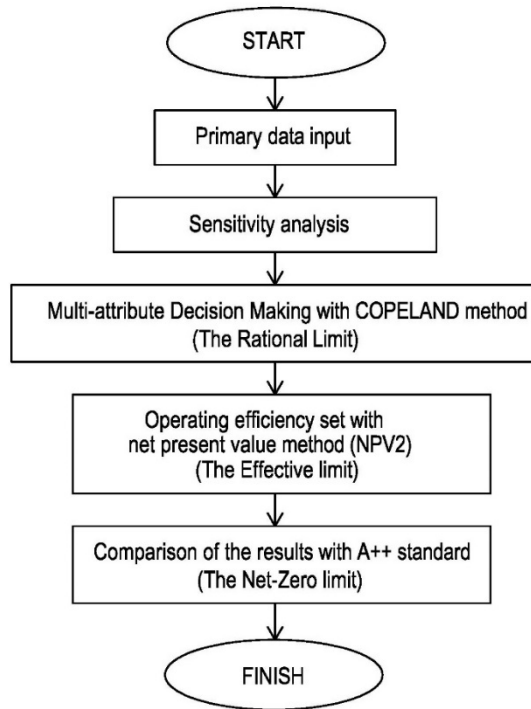
*Phase 13.* Synthesis of results. The comparison of results is implemented in this phase: 1) effective thickness of thermal insulation layer; 2) effective global costs during estimated period of 30 years; 3) effective payback periods.

### **3. Practical Application of Multi-purpose Selectonovation Model to Detached Residential Building**

On the grounds of the concept of energy performance and economic efficiency in this paper the multi-attribute integrated decision making model algorithm was applied practically and multi-purpose selectonovation assessment system was created to select an optimal thermal insulation layer for envelopes of new detached residential building. Centralized database consists of three separate building envelopes variant design matrices: floor on ground level, walls and roof.

On the base of *Microsoft Excel* multi-purpose selectonovation simulation program TERMO-SELECT *beta* version was created. Its algorithm is shown in Fig. S2.

When the energy of biofuel and natural gas is used, rationality and energy efficiency threshold of the floor on ground level thermal insulation layer thickness are significantly different from the nearly zero-energy building (standard of the year 2021). When setting cost-optimal requirements A++ energy efficiency standard is the most beneficial for the buildings which use the energy of central heating systems and electricity.



**Fig. S2.** The algorithm of multi-purpose selection simulation program (TERM-SELECT) (created by the author)

To insulate the wall envelopes according to the A++ energy efficiency standard is effective only then when a building uses the energy of central heating systems and electricity. In other cases rational and effective are only C, B\* and A energy efficiency classes. It therefore follows that to design A++ class envelopes for building which uses energy of biofuel and natural gas, from the year 2021 shall be the more expensive option, i. e. the thickness and price of thermal insulation layer shall be bigger than the lowest price according to cost-optimal level (rationality boundary).

According to all envelopes analysed, rational and effective thickness of roof thermal insulation layer is the most distant from the A++ class standard requirements, i.e. it is economically rational to insulate envelopes by substantially thinner layers. For example, when building uses the energy of biofuel, it is rational to insulate according to the requirements of D energy efficiency class, and energy efficiency threshold shall be only as of C class. It is obvious that when the electricity energy is used, it is effective to insulate thicker than it is indicated in requirements of A++ class standard.



## General Conclusions

Solving the scientific problem identified in the thesis and aiming to achieve the formulated goal and implementing the tasks set in this paper according to the results of theoretical and empirical investigations, following statements could be drawn:

1. After analysis of scientific literature, six main concepts regarding design of nearly zero-energy buildings (NZEB) are discovered:
  - balance of energy, environment and economic measures, therefore NZEB simulation tools must have possibility of multi-attribute assessment;
  - it is essential to take into account climate factors;
  - passive strategies must be used (natural lighting, ventilation, thermal inertia and sun protection devices);
  - NZEB should meet all energy efficiency standards according to the thickness of optimal thermal insulation layer for building envelopes and requirements for air-tightness;
  - engineering systems which use renewable energy resources are integral part of NZEB.
  - to design NZEB is a big goal (challenge), therefore in order to achieve this goal innovative decisions and technologies are required.

On the grounds of named aspects it is proposed to solve the integrated and complex tasks of selection of optimal thermal insulation layer.

2. It was estimated that the decision was made correctly if it meets climate, energy performance and economic efficiency criteria according to the life cycle of measure. To solve such complex tasks multi-attribute decision making methods are proposed.
3. Chapter 2 of this thesis presents created by the author multi-attribute decision making integrated model algorithm. From a scientific perspective such integrated model is useful because person concerned may make rational decision and compare it with the other variants rather quickly.
4. To be based on principles of life cycle analysis and energy efficiency selection model complex of multi-attribute decision making methods was applied: SAW method + COPRAS method + TOPSIS method + integrated COPELAND method. It is proposed to apply created by the author algorithm of multi-attribute decision making model to solve selection tasks in the phases of design in investment planning.
5. By applying created by the author model algorithm, practical example of selection of optimal thermal insulation layer for detached residential building envelopes was formulated and solved, which meets normative requirements of Lithuanian Building Technical Regulations. On the base of created algorithm thermal insulation layers, materials and various heat sources in the other type of buildings may be assessed as well.
6. Efficiency of thermal insulation layer for detached residential building envelopes is investigated empirically in this paper according to the provisions of normative documents valid in the Republic of Lithuania. The results of solved tasks are

sensitive to energy price fluctuations. In this paper the average energy price in Lithuania for the year 2015 is applied. Each year in the future it is essential to consider the variations of this price and to new scenarios of rising energy prices. In order to improve reliability of tasks' solutions it is advisable to include extra MADM methods into the model of task solving.

7. It was estimated that effective thickness of thermal insulation layer depends directly on the type of energy source, climate data (the difference up to 22 percent) and system of scenarios of rising energy prices.
8. Aiming to apply the created model to solve tasks in the other state and if the energy efficiency policy will undergo a major changes it is essential to implement extra empirical research.

---

## Priedai\*

A priedas. Atitvarų (grindų ant grunto, sienų ir stogo) mazgai .....	137
B priedas. Vidutinė energijos kaina Lietuvoje 2015 m. ....	141
C priedas. Daugiatikslių sprendimo metodų skaičiavimų rezultatai .....	145
D priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje .....	149
E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos .....	167

---

\* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

DONATAS AVIŽA

PASTATO ATITVARŲ RACIONALIAUS  
TERMOIZOLIACINIO SLUOKSNIO  
DAUGIATIKSLĖ SELEKTONOVACIJA

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
statybos inžinerija (02T)

MULTI-PURPOSE SELECTONOVATION  
OF AN OPTIMAL THERMAL INSULATION LAYER  
FOR BUILDING ENVELOPES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Civil Engineering (02T)

2016 04 05. 12,5 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius